

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**PROJETO, MICROFABRICAÇÃO E  
CARACTERIZAÇÃO DE DEFLETOR DE LUZ  
DE SILÍCIO ACIONADO POR INDUÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**PEDRO RICARDO BARBAROTO**

**Orientador: Dr. Ioshiaki Doi**

DMCSI / FEEC / UNICAMP

**Co-Orientador: Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira**

MIC / LNLS

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch – DSIF/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Renato Pavanello – DMC/FEM/UNICAMP

Dr. José Alexandre Diniz – CCS/UNICAMP

Campinas – SP

Maio de 2002

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B232p      Barbaroto, Pedro Ricardo  
Projeto, microfabricação e caracterização de defletor de  
luz de silício acionado por indução / Pedro Ricardo  
Barbaroto.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientadores: Ioshiaki Doi e Luiz Otávio Saraiva  
Ferreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de

1. Scanner ótico. 2. Dispositivos eletromecânicos. 3.  
Litografia. 4. Fotolitografia. 5. Indução eletromagnética. I.  
Doi, Ioshiaki. II. Ferreira, Luiz Otávio Saraiva. III.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação. IV

*Dedico esta tese aos meus pais,  
Alcindo e Conceição  
e à minha mulher Tatiana.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus professores e amigos, Augusto Redolfi e Marcelo Fukui, que me incentivaram a realizar este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ioshiaki Doi, pela confiança em mim depositada.

Agradeço especialmente ao meu co-orientador, Prof. Dr. Luiz Otávio Saraiva Ferreira, pela paciência e disponibilidade em todos os momentos.

Agradeço ao Grupo de Microfabricação do LNLS, composto pela seguinte equipe: Luiz Otávio, Grazielle, Maria Helena e Izaque e mais recentemente pelo Julio César, que sempre estiveram disponíveis a colaborar e compartilhar suas experiências em processos, onde a maior parte do trabalho foi desenvolvida.

Ao Centro de Componentes Semicondutores CCS/UNICAMP, na pessoa de seu coordenador Prof. Jacobus, e à toda sua equipe: Diniz, Godoy, Mara, Daniel, Regina, Lúcia e demais funcionários e colaboradores, agradeço pela utilização dos laboratórios e pela oxidação e metalização das lâminas de silício. Uma boa parte deste trabalho foi realizada no CCS.

Agradeço ao Ângelo e Luiz Carlos, do extinto grupo de optoeletrônica do CPqD, e atualmente pertencentes ao LNLS, pelas dicas e ajuda no início do trabalho.

Ao laboratório de microscopia eletrônica do LNLS, sou grato pelo microscópio eletrônico de varredura.

Agradeço ao LNLS, que permitiu a realização deste trabalho em seus laboratórios.

E por fim, agradeço a FAPESP, pela manutenção da minha bolsa de mestrado e pelo financiamento da infra-estrutura utilizada para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho consiste no projeto, microfabricação e caracterização de defletor de luz de silício acionado por indução, denominado “scanner”.

Os defletores de luz são dispositivos que fazem a varredura de feixes luminosos e são empregados em impressoras a laser, leitores de códigos de barras, fotocompositoras, projetores de imagens a laser e instrumentação. Diversas técnicas foram estudadas, desenvolvidas e aperfeiçoadas, para que o dispositivo pudesse ser fabricado, tais como: corrosão anisotrópica compensação de cantos convexos, filmes finos, fotolitografia de fotorresistes espessos e eletroformação. Um protótipo do scanner indutivo em tamanho aumentado 5x (50 mm x 130 mm) foi feito em placa de circuito impresso e testado. O protótipo apresentou um ângulo de deflexão mecânico do espelho de

-a-pico à frequência de ressonância de 58 Hz. A partir dos resultados obtidos fez-se a miniaturização do dispositivo e a otimização do processo de fabricação. Para essa miniaturização, foi desenvolvido um modelo matemático do dispositivo, que permite projetar scanners com ângulo de deflexão e frequência de ressonância desejados. Para a construção do scanner miniaturizado foi desenvolvido um novo processo de microfabricação, o qual foi chamado de **Si-LiG**. Esse processo une a litografia profunda e eletroformação de ouro com a microusinagem química de substrato de silício em solução aquosa de KOH (Hidróxido de Potássio). A microusinagem química e a técnica de compensação de cantos convexos foram estudadas, caracterizadas e aplicadas na fabricação do dispositivo. Um banco de testes foi construído, onde o scanner indutivo de silício apresentou ângulo de deflexão mecânico do -a-pico à frequência de ressonância de 1311 Hz.

Os dispositivos comerciais disponíveis atualmente são fabricados com técnicas convencionais de mecânica, que os tornam complexos e caros. Já os scanners produzidos com a tecnologia **Si-LiG** que utilizam técnicas de microfabricação, podem ser feitos em larga escala e atingir baixo custo.

## ABSTRACT

This work presents the design, microfabrication and characterization of silicon light deflector actuated by electromagnetic induction, that is called “scanner”.

The light deflectors are devices that scan a light beam and are used in laser printers, bar code readers, laser imagesetings and instrumentation.

Several techniques were studied, developed and improved, so that the device could be made, such as: anisotropic silicon etching, corner compensation, thin films, thick photoresist photolithography and metal electroplating. A prototype of the inductive scanner in augmented 5x size (50 mm x 130 mm) was made in printed circuit board and tested. Thats prototype presented a mechanical deflection angle of the mirror of 9°pp at resonance frequency of 58 Hz. From thats results was made the miniaturization of the device and the process optimization. A mathematical model of the device was developed to project scanners from deflection angle and resonance frequency specification.

A novel microfabrication process, called of the Si-LiG, was developed specifically for the inductive scanner. This process combine deep lithography and gold electroplating with bulk silicon micromachining in aqueous KOH solution. The micromachining and the convex corner compensation techniques was studied, characterized and applied in the fabrication of the device.

A test bench was made where the inductive silicon scanner presented a mechanical deflection angle of the mirror of 9,15°pp at resonance frequency of 1311 Hz.

At present, the available commercial devices are made with conventional mechanics techniques, what make them complex and expensive. In other hand scanners produced by Si-LiG technology that uses microfabrication techniques, can be made in large scale and achieve low cost.

# ÍNDICE

---

---

<b>Resumo .....</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice .....</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>x</b>
<b>Siglas e Abreviaturas .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>01</b>
<b>Capítulo 1 – Scanners .....</b>	<b>03</b>
<b>Capítulo 2 – O Projeto .....</b>	<b>08</b>
2.1 Introdução .....	08
2.2 Modelo matemático das barras de torção .....	09
2.3 Modelo eletromecânico equivalente .....	14
2.4 Dimensionando o scanner indutivo .....	22
2.5 Projeto e fabricação do protótipo do scanner .....	30
<b>Capítulo 3 – O Circuito de Acionamento (Estator) .....</b>	<b>33</b>
3.1 O projeto .....	33
3.2 A simulação .....	36
3.3 Confeção e caracterização .....	38
3.4 Testes com o protótipo em PCB .....	40



<b>Capítulo 4 – O Processo de Microfabricação .....</b>	<b>43</b>
4.1 Introdução .....	43
4.2 Confeção da máscara litográfica .....	44
4.2.1 Adição de estruturas de compensação de cantos.....	46
4.3 O processo Si-LiG .....	48
4.3.1 Etapas principais do processo .....	49
4.3.2 Montagem dos dispositivos .....	51
 <b>Capítulo 5 – A Caracterização do Dispositivo .....</b>	 <b>53</b>
5.1 Metrologia .....	53
5.2 Resistência elétrica da bobina .....	59
5.3 O dispositivo no banco de teste .....	62
 <b>Capítulo 6 – Conclusões e Perspectivas Futuras .....</b>	 <b>69</b>
6.1 Conclusões .....	69
6.2 Perspectivas futuras .....	72
 <b>Apêndice A - O Processo de Fabricação Detalhado .....</b>	 <b>73</b>
A 1 O processo de microfabricação .....	73
A 1.1 Abertura das janelas de corrosão no SiO <sub>2</sub> .....	73
A 1.2 Metalização da bobina .....	75
A 1.3 Microusinagem química .....	77
A 1.4 Metalização do espelho .....	77
A 1.5 Montagem dos dispositivos .....	77
A 2 Caracterização da microusinagem química .....	79
A 3 Estruturas de compensação de cantos .....	83

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

---

Figura 1.1 – Sistema de varredura genérico. Baseada em [1].	03
Figura 1.2 – Scanner de Petersen [2].	04
Figura 1.3 – Scanner galvanométrico [9].	05
Figura 1.4 – Amplitude da resposta em frequência do scanner indutivo de Ferreira [10].	06
Figura 1.5 – Scanner de Ferreira [10].	06
Figura 2.1 - Scanner Indutivo, o estator não é mostrado.	08
Figura 2.2 - Modelo Eletromecânico equivalente para o Scanner Indutivo [3].	14
Figura 2.3 – Desenho do Scanner Indutivo e suas dimensões em mm.	22
Figura 2.4 – Amplitude da resposta em frequência para o scanner calculado.	27
Figura 2.5 – Fase da resposta em frequência para o scanner calculado.	28
Figura 2.6 – Desenho do Protótipo.	30
Figura 2.7 – Foto do Protótipo Fabricado.	31
Figura 3.1 – Modelo para o circuito magnético [1].	33
Figura 3.2 – Modelo do circuito de acionamento do scanner.	34
Figura 3.3 – Fluxos no circuito magnético.	35
Figura 3.4 – Resultado da simulação do circuito magnético no <i>FEMM</i> .	37
Figura 3.5 – Foto do circuito magnético fabricado.	39
Figura 3.6 – Foto do protótipo inserido no estator.	40

Figura 3.7 – Amplitude da resposta em frequência do protótipo em PCB. ....	41
Figura 4.1 – (a) Desenho da máscara das janelas de corrosão e (b) Desenho da máscara das bobinas. ....	45
Figura 4.2 – Estrutura de compensação tipo haste inclinada. ....	46
Figura 4.3 – Desenho do dispositivo com as estruturas de compensação. ....	47
Figura 4.4 - Etapas do processo de microfabricação do scanner. ....	50
Figura 4.5 – Scanner Indutivo pronto, (A) e (B) vistas em ângulo, (C) bobinas eletroformadas em Au e (D) scanner montado no suporte de acrílico. ....	51
Figura 5.1 – Microscópio eletrônico de varredura. ....	53
Figura 5.2 – Vídeo-microscópio com câmera CCD. ....	54
Figura 5.3 – Tela do software <i>Inspector 3.1</i> . ....	55
Figura 5.4– Tela do software <i>Image Tool</i> . ....	55
Figura 5.5– Micrografias do microscópio eletrônico. (A) base da barra de torção, (B) topo da barra de torção, (C) comprimento da barra de torção e (D) seção transversal da barra de torção. ....	56
Figura 5.6– Fotografias do vídeo-microscópio. (A) comprimento do rotor, (B) largura do rotor, (C) comprimento do frame e (D) largura do frame. ....	57
Figura 5.7 – Medida da resistência da bobina. ....	59
Figura 5.8 – Lâmina de Si com as 4 bobinas eletroformadas. ....	60
Figura 5.9 – Detalhe da bobina eletroformada em ouro. ....	61
Figura 5.10 – Montagem do sistema no banco de teste. ....	62
Figura 5.11 – Rack de equipamentos utilizados nas medidas. ....	63
Figura 5.12 – Diagrama do sistema de testes do scanner. ....	64
Figura 5.13 – Janela do software <i>VEE Pro 6.0</i> da Agilent Technologies. ....	65
Figura 5.14 – Gráfico da amplitude da resposta em frequência. ....	66

Figura 5.15 – Gráfico da fase da resposta em frequência. ....	66
Figura 5.16 – Gráfico da amplitude da resposta em frequência. Curvas: (A): teórica e (B): experimental. ....	67
Figura 5.17 – Gráfico da fase da resposta em frequência. Curvas: (A): teórica e (B): experimental. ....	68
Figura A1 – Scanner Indutivo fabricado, (A) e (B) vistas em ângulo, (C) bobinas eletroformadas em Au e (D) scanner montado no suporte de acrílico. ....	78
Figura A2 – Corrosão de Si. ....	79
Figura A3 – Reator de vidro e Banho Termostático. ....	80
Figura A4 – Curva da taxa de corrosão do Si versus concentração de KOH. ....	81
Figura A5 – Qualidade das paredes laterais para diversas concentrações. ....	82
Figura A6 – Estrutura sem compensação de canto. ....	83
Figura A7 – Estrutura de compensação tipo haste inclinada. ....	84
Figura A8 – Cantos compensados durante e no final da corrosão. ....	85

## SIGLAS E ABREVIATURAS

---

Buffer de HF: solução tampão de ácido Fluorídrico

CCD: Charge Coupled Device

DSP: Double Side Polished

FEMM: Finite Element Method Magnetics

GPIB: interface que obedece a norma IEEE 488

KOH: Hidróxido de Potássio

LASER: Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation

LED: Light Emission Diode

LIGA: do alemão: Litografie, Galvanoformung e Abformung

N<sub>e</sub>F<sub>e</sub>B: Neodímio-Ferro-Boro

PCB: Printed Circuit Board

Si: Silício

SiO<sub>2</sub>: Óxido de silício

UV: Ultra Violeta

# INTRODUÇÃO

---

Esta dissertação apresenta o projeto, microfabricação e caracterização de um defletor de luz de silício acionado por indução, denominado “scanner”. Para sua construção foi desenvolvido um processo que une a litografia profunda e eletroformação de metal com a microusinagem química de substrato de silício, que foi chamado de processo **Si-LiG**.

A motivação para este trabalho surgiu da necessidade de superar o problema de fadiga nas trilhas de alimentação da bobina móvel de scanners galvanométricos ressonantes de silício. Para isto é proposto o acionamento do dispositivo por indução eletromagnética, resultando em um scanner indutivo de silício. O desenvolvimento de um novo tipo de acionamento pode viabilizar a aplicação prática desse dispositivo em impressoras laser, leitores de códigos de barras, projetores de imagem, entre outros.

Esta dissertação será apresentada sob a forma de capítulos, e ao final de cada um, a bibliografia citada.

No **Capítulo 1** é apresentada uma introdução aos scanners e um breve histórico.

No **Capítulo 2** é apresentado o projeto do scanner indutivo, incluindo a teoria do modelo matemático, o modelo eletromecânico equivalente e o desenho do dispositivo.

No **Capítulo 3** é mostrada a concepção do acionamento para o scanner.

No **Capítulo 4** é apresentado o processo de microfabricação do scanner indutivo.

No **Capítulo 5** apresentam-se os testes e a caracterização do dispositivo no banco de testes.

No **Capítulo 6** são apresentadas uma conclusão geral do trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

# Capítulo 1

## SCANNERS

---

Os scanners são dispositivos que fazem a varredura de feixes luminosos. Eles compõem os sistemas de varredura que são empregados em impressoras a laser, leitores de códigos de barras, fotocompositoras, projetores de imagens e instrumentação <sup>[1]</sup>.

Um sistema de varredura genérico <sup>[1]</sup> é composto de 4 partes principais (fig. 1.1):

- Fonte de Luz
- Scanner
- Lentes
- Plano de Trabalho

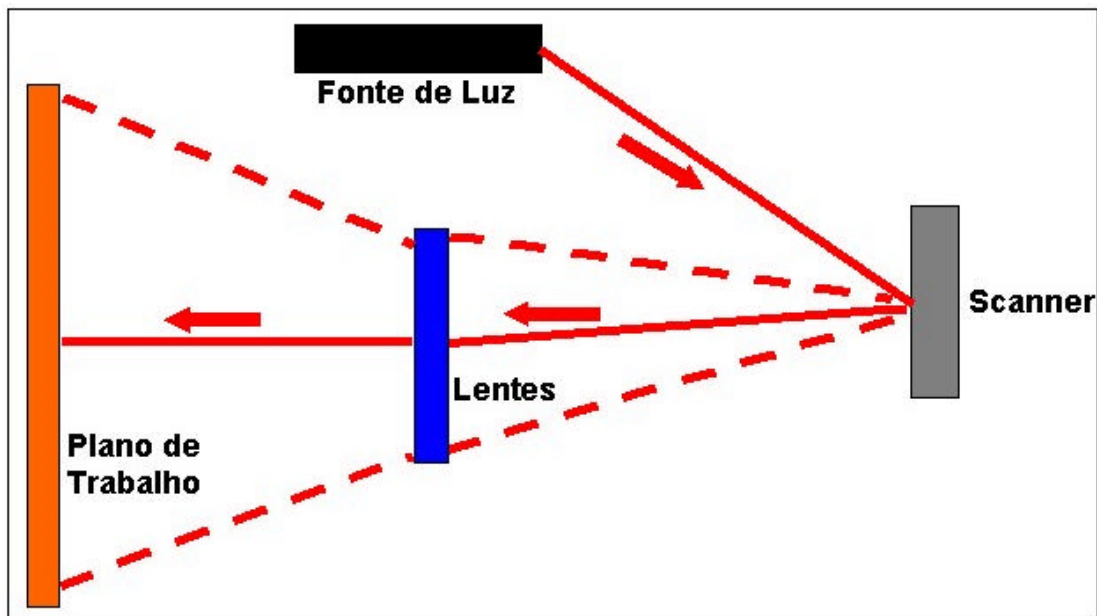


Figura 1.1 – Sistema de varredura genérico. Baseada em [1].



A fonte de luz pode ser uma lâmpada, LED ou LASER. O scanner deflete essa luz que é corrigida por lentes e projetada no plano de trabalho, que pode ser o cilindro de uma impressora a laser, a tela de um projetor de imagens ou outra superfície desejada <sup>[1]</sup>.

Atualmente, os scanners disponíveis no mercado são fabricados com técnicas convencionais de mecânica, o que os tornam complexos e caros. Em contrapartida, os scanners monolíticos de silício que são produzidos com técnicas de microfabricação, podem ser feitos em larga escala e atingir baixo custo <sup>[1]</sup>.

O primeiro scanner monolítico de silício, desenvolvido por Petersen em 1980 <sup>[2]</sup>, possuía acionamento eletrostático e necessitava de tensões de 300 a 400 volts, o que dificulta sua aplicação prática. O acionamento eletrostático consiste em se aplicar uma tensão alternada nos eletrodos 1 e 2 (fig. 1.2). O espelho que está aterrado se movimenta na frequência da tensão aplicada pelo princípio da atração e repulsão de cargas elétricas. Outros foram criados <sup>[3-7]</sup>, mas apresentaram baixo fator de qualidade. O fator de qualidade é definido como sendo a frequência de ressonância dividida pela largura de banda. A largura de banda é medida a -3 dB do pico da frequência.

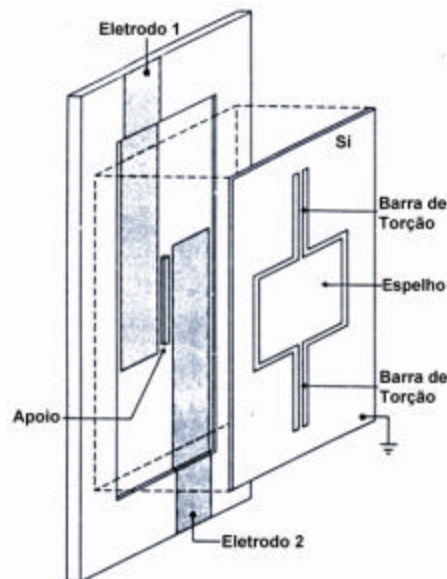


Figura 1.2 – Scanner de Petersen <sup>[2]</sup>.

Melhores resultados foram obtidos com o emprego de deflexão [8,9], que resultou em scanners galvanométricos ressonantes de silício com características de desempenho similares aos seus equivalentes comerciais (fig. 1.3). Os scanners galvanométricos funcionam por meio da ação da força de Lorentz, isto é, o aparecimento de força mecânica em circuitos elétricos imersos em campos magnéticos.

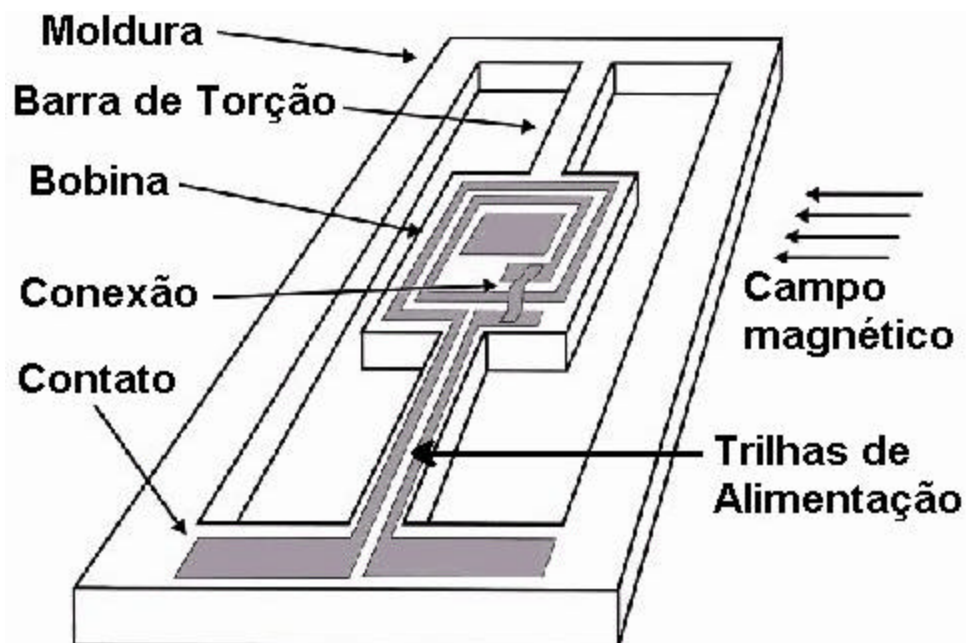


Figura 1.3 – Scanner galvanométrico [9].

Essa concepção de dispositivo, no entanto, apresenta ainda um problema de fadiga nas trilhas de alimentação da bobina móvel que estão sobre a barra de torção. O que se convém superar, tornando-se, deste modo, a motivação deste trabalho.

experimentalmente por Ferreira et al. <sup>[10]</sup>, apresentando deflexão do espelho próxima a 1 grau pico-a-pico à frequência de 2200Hz (fig. 1.4). Esse dispositivo mostrou um problema de vibração do conjunto durante sua

ssa vibração pode ser atribuída à maneira como o circuito de acionamento foi projetado e montado no banco de teste (fig.1.5). Neste trabalho tomou-se um cuidado muito especial na concepção do acionamento a fim de evitar problemas de vibrações espúrias.

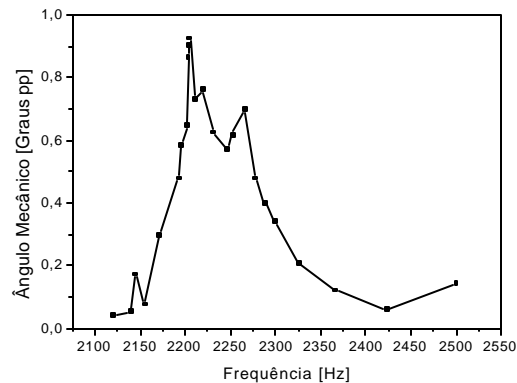


Figura 1.4 – Amplitude da resposta em frequência do scanner indutivo de Ferreira [10].

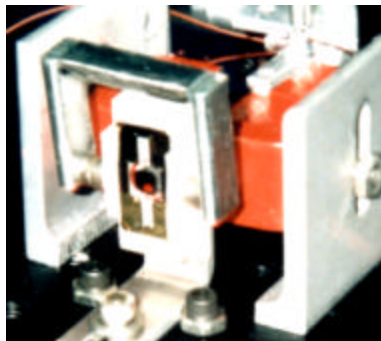


Figura 1.5 – Scanner de Ferreira [10].

O capítulo 2 apresenta o projeto do scanner indutivo.

*Sensors and Actuators - A*, Vol.73, No.3,  
pp.252-260, March,1999.

10. L. O. S. Ferreira, F. Pourlborz, P. Ashar, and C. Khan-Malek, "Torsional Scanning Mirrors Actuated by Electromagnetic Induction and Acoustic Waves", *International Conference on Microelectronics and Packaging-ICMP'98*, Curitiba, PR, Brazil, Aug/98.

## Capítulo 2

# O PROJETO

---

### 2.1 INTRODUÇÃO

O scanner indutivo deve apresentar um ângulo de deflexão de 10 graus pico-a-pico à frequência de ressonância de 2000 Hz. O dispositivo tem o princípio de funcionamento semelhante a um motor de indução <sup>[1]</sup>. O rotor do scanner é semelhante ao rotor de um motor de indução e a função de estator é feita por um circuito magnético externo. O estator é a parte fixa, que consiste de enrolamentos em um núcleo de ferro laminado. Este estator induz uma tensão na bobina do rotor, que por sua vez faz circular uma corrente elétrica pela bobina, que interagindo com o campo magnético paralelo à bobina faz surgir um torque em função da tensão induzida. Um torque de reação surge no rotor que é suspenso por barras de torção. A fig. 2.1 apresenta o scanner indutivo.

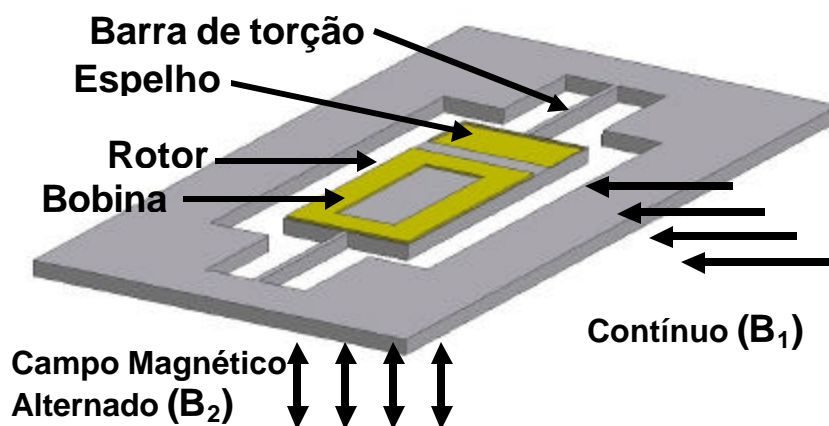


Figura 2.1 - Scanner Indutivo, os campos magnéticos são fornecidos pelo estator que não é mostrado na figura.

## CO DAS BARRAS DE TORÇÃO

O modelo das barras de torção serve para que dados o ângulo de deflexão e frequência desejados e as dimensões do dispositivo, ele forneça o comprimento e a largura necessária às barras. A microusinagem química de uma lâmina de Si <100> produz paredes laterais inclinadas em 54,74°, o que resulta em barras de torção com perfil trapezoidal, que serão aproximadas para um perfil triangular para o cálculo. As relações entre tensão cisalhante e ângulo de torção e momento torçor, comprimento e módulo de rigidez de barras de torção de material e perfil conhecidos <sup>[2]</sup> são dados por:

$$s = \frac{T}{Q} \quad (2.1)$$

$$q = \frac{T \cdot L}{K \cdot G} \quad (2.2)$$

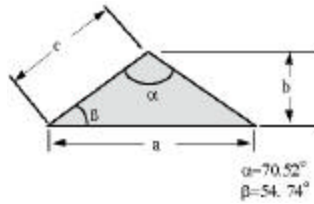
Onde:

$s$ = tensão cisalhante	[Pa]
$q$ = ângulo de torção	[Rad]
$T$ = momento torçor	[N.m]
$L$ = comprimento da barra de torção	[m]
$G$ = módulo de rigidez do material da barra	[Pa]
$K$ = função da forma da barra de torção	[m <sup>4</sup> ]
$Q$ = função da forma da barra de torção	[m <sup>3</sup> ]

Para barras com perfil de triângulo isósceles <sup>[2]</sup> tem-se:

$$K = \frac{a^3 \cdot b^3}{15a^2 + 20b^2} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{K}{b \left[ 0,2 + 0,309 \frac{a}{b} - 0,0418 \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right]} \quad (2.4)$$



Onde:

$a$  = comprimento da base do triângulo isósceles [m]

$b$  = altura do triângulo isósceles [m]

$c$  = comprimento dos lados iguais do triângulo isósceles [m]

Os lados iguais do triângulo isósceles formam entre si um ângulo alfa que, no caso das barras de torção feitas por corrosão de silício <100> é igual a 70,52 graus, o que implica que os ângulos iguais ( $\beta$ ) do triângulo isósceles são iguais a 54,74 graus.

Portanto dada a espessura  $b$  da lâmina de silício (onde  $b$  é a altura do triângulo isósceles correspondente ao perfil das barras de torção imediatamente definidos os valores de  $a$  e  $c$  através das relações abaixo:

$$\mathbf{b} = 54,74^\circ \quad (2.5)$$

$$a = \frac{2b}{\tan \mathbf{b}} \quad (2.6)$$

$$\tan \mathbf{b} = 1,414 \quad (2.7)$$

Portanto:

$$a = \sqrt{2} \cdot b \quad (2.8)$$

Substituindo-se  $a$  por sua expressão em função de  $b$  na eq. (2.3) tem-se:

$$K = \frac{\sqrt{2} \cdot b^4}{25} \quad (2.9)$$

E substituindo-se  $K$  e  $a$  por suas funções de  $b$  na eq. (2.4) tem-se:

$$Q = 0,1022b^3 \quad (2.10)$$

De onde se pode calcular o valor da máxima tensão cisalhante em função do torque  $T$  e da espessura da lâmina  $b$ :

$$s = \frac{T}{0,1022b^3} \quad (2.11)$$

### **Equação do módulo de rigidez $G$ :**

O módulo de rigidez ( $G$ ) pode ser obtido a partir da Razão de Poisson ( $\nu$ ) e do Módulo de Young ( $E$ ) do material. Para o silício tais valores são:

$$\nu = 0,09 \quad (2.12)$$

$$E = 1,9 \times 10^{11} \text{ [Pa]} \quad (2.13)$$



$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.14)$$

$$G = 8.716 \times 10^{10} \text{ [Pa]} \quad (2.15)$$

### Cálculo da Frequência de Ressonância

A frequência de ressonância  $f_R$  do scanner é função do momento de inércia do rotor ( $J$ ) e do coeficiente de rigidez das barras de torção ( $k$ ), que são equacionados abaixo:

$$f_R = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (2.16)$$

### Momento de Inércia do Rotor

As seguintes variáveis definem o rotor retangular maciço:

$J$ = momento de inércia	[kg.m <sup>2</sup> ]
$b$ = espessura da lâmina de silício	[m]
$d$ = comprimento do rotor	[m]
$e$ = metade da largura do rotor	[m]
$\rho$ = densidade do silício	[kg/m <sup>3</sup> ]

A densidade do silício é:

$$\rho = 2,32 \text{ [g/cm}^3\text{]} \quad (2.17)$$

E o momento de inércia do rotor é dado por:

$$J = \frac{2}{3} e^3 \mathbf{r} l b \quad (2.18)$$

### **Coeficiente de Rigidez das Barras de Torção**

O coeficiente de rigidez é igual ao torque dividido pelo ângulo de torção provocado por esse mesmo torque (o valor para cada barra é igual ao valor dado pela equação abaixo multiplicado pelo número de barras):

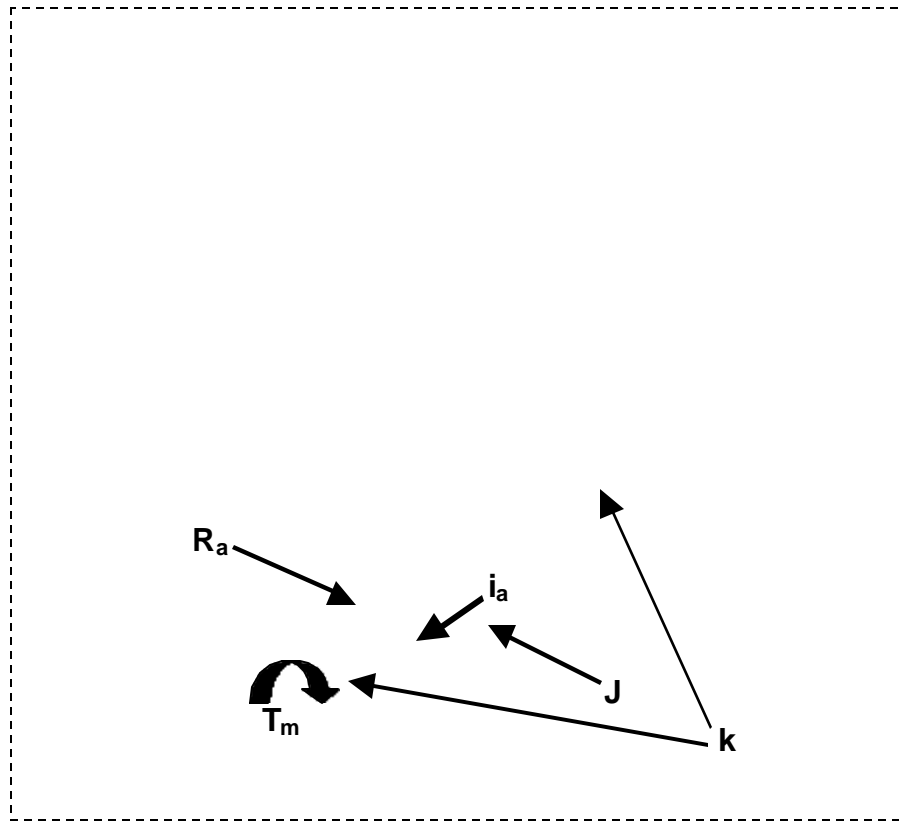
$$k = \frac{\sqrt{2} \cdot E b^4}{50(1 + \mathbf{n}) L} \quad (2.19)$$

Substituindo as eqs. (2.18) e (2.19) em (2.16) tem-se a frequência:

$$f_R = \sqrt{\frac{3\sqrt{2} \cdot E}{50(1 + \mathbf{n}) \mathbf{r} L d} \left(\frac{b}{e}\right)^3} \quad (2.20)$$

Onde  $L$  é o comprimento da barra de torção.

O modelo das barras de torção apresentado será usado no dimensionamento do scanner na seção 2.4.



$q$  o ângulo de deflexão do rotor,  $w$  a velocidade angular,  $f$  o atrito viscoso com o ar,  $J$  o momento de inércia do rotor e  $k$  a constante elástica rotacional das barras de torção.

Ao circular uma corrente alternada  $I_{in}$  pelo circuito de acionamento (estator), um campo magnético pulsante  $B_2$  será gerado, o qual vai induzir a  $V_a$  na bobina do rotor que faz circular uma corrente  $I_a$  (força eletromotriz). A resistência elétrica da bobina do rotor é  $R_a$  e a indutância é  $L_a$ , que será desprezada em nosso caso devido à bobina possuir apenas uma volta e seu valor ser muito pequeno. A tensão  $V_b$  é a força contraeletromotriz produzida pelo movimento do rotor dentro do campo magnético permanente  $B_1$  paralelo à bobina. Para pequenos valores de  $q$  (menor que  $10^\circ$ ), podemos assumir que  $\sin q = 0$  e portanto a força contraeletromotriz devida a  $B_2$  será desprezada.

Dado um torque produzido ( $T_m$ ), um torque reativo ( $T_L$ ) igual é gerado nas barras de torção do rotor do scanner.

$$T_m(s) = T_L(s) \quad (2.21)$$

As equações estão escritas no formato da Transformada de Laplace que são comuns no equacionamento de sistemas lineares.

$$T_m(s) = K_m I_a(s) \quad \text{ou} \quad t_m(t) = K_m i_a(t) \quad (2.22)$$

A constante  $K_m$  é uma função da geometria da bobina do rotor e do campo magnético paralelo, e é dada por:

$$K_m = nB_1 A \cos(q) \quad (2.23)$$

$$T_m(s) = nB_1 A I_a(s) \quad \text{ou} \quad t_m(t) = nB_1 A i_a(t) \quad (2.25)$$

Para calcular  $I_a$  é necessário primeiro conhecermos  $V_a$ ,  $R_a$  e  $V_b$  :

$$V_a = (R_a I_a(s) + V_b(s)) \quad (2.26)$$

Onde  $V_b(s)$  é a força contraeletromotriz produzida pelo movimento da bobina no campo paralelo  $B_1$  :

$$V_b(s) = K_b \omega(s) \quad (2.27)$$

$K_b$  = constante de conversão de energia mecânica para elétrica

Substituindo (2.27) em (2.26) fica:

$$I_a(s)(R_a) = V_a(s) - K_b \mathbf{w}(s) \quad \text{ou} \quad R_a i_a(t) = v_a(t) - K_b \mathbf{w}(t) \quad (2.28)$$

Isolando-se a corrente  $I_a$  temos:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \mathbf{w}(s)}{R_a} \quad (2.29)$$

Substituindo (2.29) em (2.22) a expressão para o torque gerado fica em

$V_a$  :

$$T_m(s) = K_m \left( \frac{V_a(s) - K_b \mathbf{w}(s)}{R_a} \right) \quad (2.30)$$

A constante  $K_b$  de conversão de energia mecânica para elétrica é:

$$K_b = nB_l A \quad (2.31)$$

A velocidade angular do rotor  $\mathbf{w}$  pode ser escrita como a derivada da posição angular  $\mathbf{q}$  :

$$\mathbf{w}(s) = s\mathbf{q}(s) \quad (2.32)$$

A equação final do torque gerado fica:

$$T_m(s) = K_m \left( \frac{V_a(s) - K_b s\mathbf{q}(s)}{R_a} \right) \quad (2.33)$$

$\mathbf{q}$  é o ângulo de deflexão do rotor, que é a integral no tempo da velocidade angular  $\mathbf{w}$  ( $\mathbf{w}=\dot{\mathbf{q}}$ ).

Substituindo (2.33) e (2.34) em (2.21) temos:

$$K_m \left( \frac{V_a(s) - K_b s \mathbf{q}(s)}{R_a} \right) = (Js^2 + fs + k) \mathbf{q}(s) \quad (2.36)$$

Multiplicando os dois lados por  $R_a$  fica:

$$K_m (V_a(s) - K_b s \mathbf{q}(s)) = R_a (Js^2 + fs + k) \mathbf{q}(s) \quad (2.37)$$

Isolando os termos em  $\mathbf{q}(s)$ :

$$K_m V_a(s) = R_a (Js^2 + fs + k) \mathbf{q}(s) + K_m K_b s \mathbf{q}(s) \quad (2.38)$$

Colocando  $\mathbf{q}(s)$  em evidência:

$$K_m V_a(s) = \mathbf{q}(s) [R_a Js^2 + s(R_a f + K_m K_b) + R_a k] \quad (2.39)$$

Isolando  $\mathbf{q}(s)$  temos:

$$\mathbf{q}(s) = \frac{K_m V_a(s)}{R_a [Js^2 + s(f + \frac{K_m K_b}{R_a}) + k]} \quad (2.40)$$

$$K_m = K_b = nB_1 A \quad (2.41)$$

Substituindo (2.41) em (2.40) temos:

$$\mathbf{q}(s) = \frac{nB_1 A V_a(s)}{R_a [Js^2 + s(f + \frac{(nB_1 A)^2}{R_a}) + k]} \quad (2.42)$$



Dividindo o numerador e o denominador por  $R_a J$  fica:

$$\mathbf{q}(s) = \frac{nB_1 A}{R_a J} \cdot \frac{V_a(s)}{s^2 + s\left(\frac{f}{J} + \frac{(nB_1 A)^2}{R_a J}\right) + \frac{k}{J}} \quad (2.43)$$

Daqui por diante a tensão  $V_a$  será expressa em função do campo magnético alternado  $B_2$ :

$$V_a(s) = -AsB_2(s) \quad (2.44)$$

Substituindo (2.44) em (2.43) fica:

$$\mathbf{q}(s) = \frac{nB_1 A}{R_a J} \cdot \frac{(-AsB_2(s))}{s^2 + s\left(\frac{f}{J} + \frac{(nB_1 A)^2}{R_a J}\right) + \frac{k}{J}} \quad (2.45)$$

Rearranjando, temos:

$$\mathbf{q}(s) = \frac{-nB_1 A^2}{R_a J} \cdot \frac{sB_2(s)}{s^2 + s\left(\frac{f}{J} + \frac{(nB_1 A)^2}{R_a J}\right) + \frac{k}{J}} \quad (2.46)$$

Expressando (2.46) na forma padrão para um sistema de segunda ordem fica:

$$\mathbf{q}(s) = K_0 \frac{\dot{u}_n^2}{s^2 + 2\alpha \dot{u}_n s + \dot{u}_n^2} s B_2(s) \quad (2.47)$$

Onde:

$$\dot{u}_n^2 = \frac{k}{J} \quad (2.48)$$

$$K_0 \dot{u}_n^2 = \frac{-n B_1 A^2}{J R_a} \quad (2.49)$$

$$K_0 = \frac{-n B_1 A^2}{k R_a} \quad (2.50)$$

$$2\alpha \dot{u}_n = \left[ \frac{f}{J} + \frac{(n B_1 A)^2}{J R_a} \right] \quad (2.51)$$

Isolando a constante de amortecimento  $\alpha$  fica:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{4Jk}} \left[ f + \frac{(nBA)^2}{R_a} \right] \quad (2.52)$$

Modelamento matemático baseado em [3 e 4].

A seguir é feito o dimensionamento do scanner utilizando o modelo apresentado.

## 2.4 DIMENSIONANDO O SCANNER INDUTIVO

Com o modelamento matemático apresentado na seção anterior fez-se o dimensionamento do scanner indutivo. Foi utilizado para este dimensionamento o software *Mathcad 2000*. Entrando-se com as dimensões e a frequência desejadas para o scanner, e os campos magnéticos paralelo e pulsante gerados pelo circuito de acionamento, obtém-se o comprimento das barras de torção e o valor da resistência elétrica da bobina do rotor. A fig. 2.3 mostra o desenho do scanner indutivo e suas dimensões em mm.

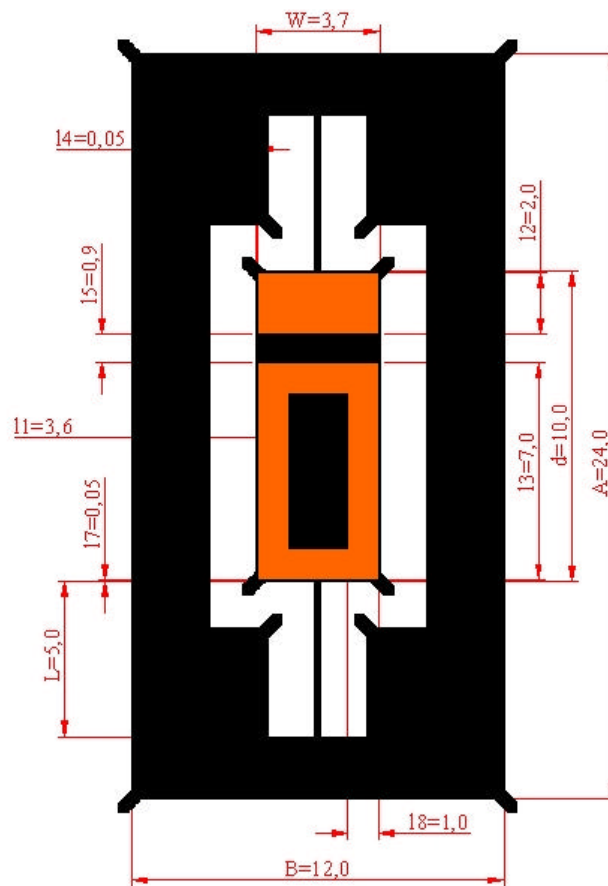


Figura 2.3 – Desenho do Scanner Indutivo e suas dimensões em mm.

O scanner proposto possui formato retangular de  $12 \times 24 \text{ mm}^2$  e rotor de  $3,7 \times 10 \text{ mm}^2$  suspenso por duas barras de torção.

Como a usinagem química do silício produz cavidades com paredes laterais inclinadas, a largura e o comprimento do rotor devem ser acrescidos de um delta para termos a largura e o comprimento médios, o que é feito abaixo:

$$b = 200 [\mu\text{m}] \quad (\text{espessura do substrato de silício}) \quad (2.53)$$

$$\Delta = \frac{b}{\sqrt{2}} \quad (\text{fator de correção devido a inclinação das paredes}) \quad (2.54)$$

$$d = 10\text{mm} + \Delta \quad (\text{comprimento do rotor}) \quad (2.55)$$

$$f_R = 2 [\text{kHz}] \quad (\text{frequência desejada}) \quad (2.56)$$

$$l_1 = 3,6 [\text{mm}] \quad (\text{largura da bobina}) \quad (2.57)$$

$$l_2 = 2 [\text{mm}] \quad (\text{comprimento do espelho}) \quad (2.58)$$

$$l_3 = 7 [\text{mm}] \quad (\text{comprimento da bobina}) \quad (2.59)$$

$$l_4 = 50 [\mu\text{m}] \quad (\text{borda entre bobina e rotor}) \quad (2.60)$$

$$l_5 = 0,9 [\text{mm}] \quad (\text{distância entre espelho e bobina}) \quad (2.61)$$

$$l_6 = 50 [\mu\text{m}] \quad (\text{borda entre espelho e rotor}) \quad (2.62)$$

$$l_7 = 50 [\mu\text{m}] \quad (\text{borda entre bobina e rotor}) \quad (2.63)$$

$$l_8 = 1 [\text{mm}] \quad (\text{largura da trilha da bobina}) \quad (2.63)$$

$$a_1 = 30 [\mu\text{m}] \quad (\text{largura do topo da barra de torção}) \quad (2.64)$$

$$e = \frac{l_1 + 2l_4 + \Delta}{2} \quad (\text{metade da largura do rotor}) \quad (2.65)$$

$$e = 1,921 [\text{mm}] \quad (2.66)$$

$$a = \sqrt{2}b + a_1 \quad (\text{base da barra de torção}) \quad (2.67)$$

$$a = 312,843 [\mu\text{m}] \quad (2.68)$$

Para as dimensões e a frequência de ressonância escolhidas, o comprimento das barras de torção deve ser:

Isolando  $L$  na equação 2.20 fica:

$$L = \frac{3\sqrt{2}E}{50(1+n)\pi d(2\pi f_R)^2} \left(\frac{b}{e}\right)^3 \quad (2.69)$$

$$L = 4,495 [\text{mm}] \quad (\text{comprimento da barra de torção}) \quad (2.70)$$

A partir dos valores obtidos e utilizando o modelamento matemático apresentado nas seções 2.2 e 2.3 podem-se calcular todos os parâmetros do dispositivo:

$$J = 2,223 \times 10^{-11} \text{ [kg.m}^2\text{]} \quad (\text{momento de inércia do rotor}) \quad (2.71)$$

$$k = 2 \cdot 1,755 \times 10^{-3} \text{ [N.m/rad]} \quad (\text{constante de rigidez das barras}) \quad (2.72)$$

$$T_L = 2k\theta \quad (\text{torque para defletir o rotor em } \theta \text{ graus a zero Hz}) \quad (2.73)$$

$$T_L = 3,063 \times 10^{-4} \text{ [N.m]} \quad (2.73)$$

$$s = 3,747 \times 10^8 \text{ [Pa]} \quad (2.74)$$

(tensão cisalhante máxima ao ângulo  $\theta$  correspondente ao torque T)

A partir da resposta em freqüência medida experimentalmente para um scanner similar <sup>[4]</sup>, extraiu-se o valor do fator de qualidade Q:

$$Q = 383 \quad (\text{fator de qualidade}) \quad (2.74)$$

O fator de qualidade  $Q$  é definido como sendo a freqüência de ressonância dividida pela largura de banda, que é medida a -3 dB do pico da freqüência.

E a partir do fator de qualidade  $Q$  obtém-se o valor da constante de amortecimento  $z$ :

$$z = \frac{1}{2Q} \quad (\text{constante de amortecimento}) \quad (2.75)$$

$$z = 1,305 \times 10^{-3} \quad (2.76)$$

A área média da bobina do rotor é:

$$A_1 = \left( l_1 - \frac{l_8}{2} \right) \cdot \left( l_3 - \frac{l_8}{2} \right) \text{ (área média da bobina)} \quad (2.77)$$

$$A_1 = 20,15 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.78)$$

E o campo paralelo  $B_1$  é arbitrado:

$$B_1 = 1600 \text{ [Gauss]} \quad (2.79)$$

Arbitrando-se um valor para a resistência elétrica da bobina do rotor, tem-se:

$$R_a = 0,015 \text{ [\Omega]} \text{ (resistência da bobina)} \quad (2.80)$$

$$\mathbf{w}_n = \sqrt{\frac{k}{J}} \text{ (frequência angular)} \quad (2.81)$$

$$f_R = \frac{\mathbf{w}_n}{2\mathbf{p}} \text{ (frequência de ressonância)} \quad (2.82)$$

$$K_0 = \frac{-B_1 A^2}{R_a k} \text{ (constante do sistema)} \quad (2.83)$$

$$K_0 = -7,069 \times 10^{-5} \text{ [m}^2 \cdot \text{Grau / Volt]} \quad (2.84)$$

Dada a função de transferência do scanner:

$$G(s) = K_0 \frac{\mathbf{w}_n^2 s}{s^2 + 2\mathbf{z}_n s + \mathbf{w}_n^2} \quad (2.85)$$

E calculando-se os valores de  $\mathbf{w}_n$ ,  $K_0$  e  $\mathbf{z}$ , tem-se a amplitude e a fase da função de transferência:

$$AG(s) = |G(s)| \quad (\text{amplitude}) \quad (2.86)$$

$$\Phi G(s) = \arctan \left( \frac{\text{Im } G(s)}{\text{Re } G(s)} \right) \quad (\text{fase}) \quad (2.87)$$

$$AG(j, \mathbf{w}_m) = 0,034 [\text{graus} / \text{Gauss}] \quad (2.88)$$

Podemos ver nas figuras 2.4 e 2.5, as curvas teóricas de amplitude e fase da resposta em frequência para o scanner indutivo.

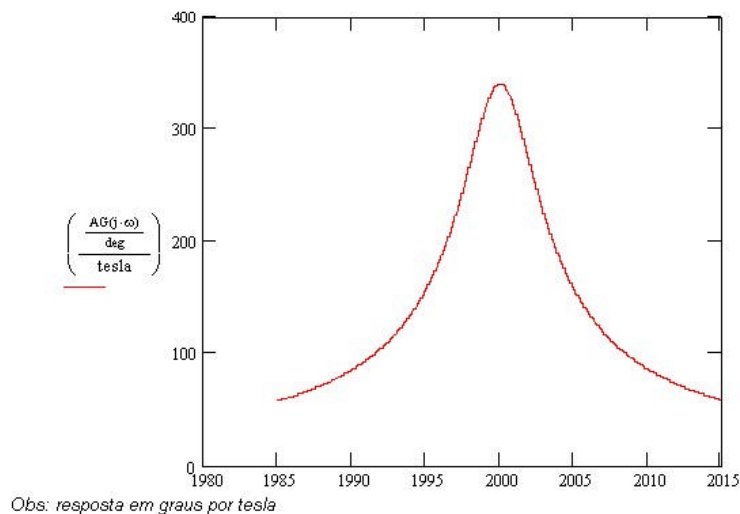


Figura 2.4 – Amplitude da resposta em frequência para o scanner calculado.



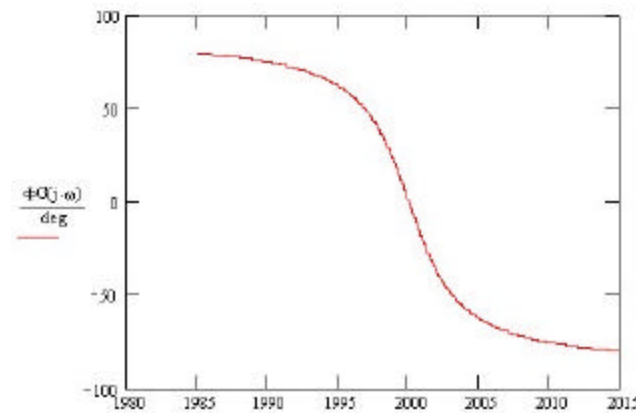


Figura 2.5 – Fase da resposta em frequência para o scanner calculado.

### Cálculo da espessura da bobina em função do ângulo desejado

Estimado o valor da resistência da bobina no passo anterior, sua espessura pode ser calculada como demonstrado abaixo:

$$r = 2,44 \times 10^{-6} [\Omega \cdot \text{cm}] \quad (\text{resistividade do ouro}) \quad (2.89)$$

$$R_a = 0,015 [\Omega] \quad (\text{resistência estimada da bobina}) \quad (2.90)$$

$$l = 17,2 [\text{mm}] \quad (\text{comprimento médio da bobina}) \quad (2.91)$$

$$A_2 = 0,028 [\text{mm}^2] \quad (\text{seção transversal da bobina}) \quad (2.91)$$

Para uma largura de bobina  $l_g = 1mm$ , como definido anteriormente, a espessura da bobina de ouro deve ser:

$$t = 28 [\mu m] \quad (\text{espessura da bobina}) \quad (2.92)$$

Para os campos magnéticos arbitrados  $B_1 = 1600Gauss$  e  $B_2 = 150Gauss$ , o ângulo de deflexão do rotor à frequência de 2 kHz será:

$$\mathbf{q} = 10,2 [\text{graus mecânicos pico-a-pico}] \quad (2.93)$$

(ângulo de deflexão do rotor)

Para se construir o scanner indutivo foi necessário que primeiro o estator fosse fabricado e caracterizado para se conhecer os campos magnéticos  $B_1$  e  $B_2$ .

Na caracterização dos campos magnéticos do circuito de acionamento (estator) foi necessária a utilização de um gaussímetro. O gaussímetro disponível possuía uma ponta de prova de 4 mm de largura e não seria possível realizar medidas em um circuito magnético miniatura. Por isto foi estator em tamanho grande, cujas dimensões fossem compatíveis com o

Um protótipo do scanner indutivo em tamanho grande também teria que ser feito para que se pudesse testar e caracterizar o estator.

A seguir são mostrados o projeto e fabricação do protótipo aumentado.

## 2.5 PROJETO E FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO DO SCANNER

O protótipo foi projetado com o software *AutoCad* em escala aumentada em 5x em relação ao scanner dimensionado na seção anterior.

são 50 mm de largura por 130 mm de comprimento e rotor de 20 mm x 50 mm. O dispositivo possui em seu rotor uma área para o espelho e outra para a bobina, conforme a fig. 2.6.

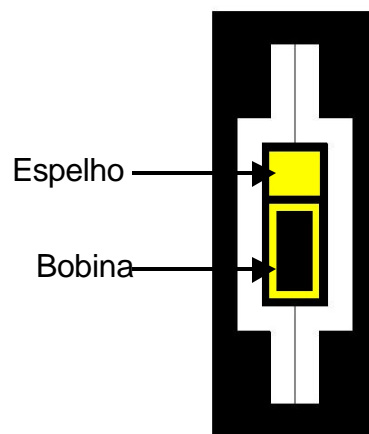


Figura 2.6 – Desenho do Protótipo.

A decisão de se fazer o espelho e a bobina em áreas separadas se deve ao fato de que a bobina deve ficar dentro de um circuito magnético e, portanto, se o espelho estivesse inscrito na bobina, não haveria como incidir o feixe de laser no espelho. Dessa forma o espelho fica com acesso facilitado.

Foi utilizado um substrato de PCB (Placa de Circuito Impresso) na fabricação do protótipo. As regiões que aparecem em branco na fig. 2.6, são as regiões vazadas que foram cortadas em uma máquina de corte de chapas a laser. O substrato possuía um filme de cobre de aproximadamente 38 $\mu$ m de espessura em ambas faces. As regiões do espelho e bobina foram definidas por processo de corrosão úmida do cobre com percloroeto de ferro em solução de 250g de percloroeto para um litro de água.

As áreas a serem definidas foram protegidas por uma máscara feita com tinta resistente ao ataque por percloroeto. A corrosão do cobre levou aproximadamente 10 minutos à temperatura de 50°C na solução.

Para que o rotor ficasse com uma constante elástica rotacional adequada ao seu funcionamento, as barras de torção foram substituídas por fios -mola, visto que o material usado como substrato não possui boas características mecânicas. Os fios de aço-mola foram fixados ao substrato com resina epóxi. A fig. 2.7 mostra o dispositivo fabricado.

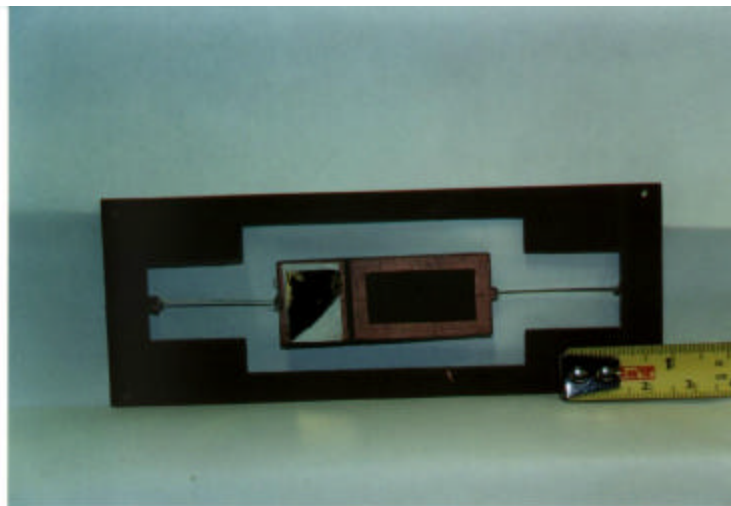


Figura 2.7 – Foto do Protótipo Fabricado.

O próximo passo foi a construção do circuito de acionamento (estator), onde o protótipo foi testado. O capítulo 3 relata a confecção e caracterização do estator.

## REFERÊNCIAS

1. A. E. Fitzgerald et al., *Máquinas Elétricas*, McGraw-Hill do Brasil, 1975.
2. R. J. Roark and W. C. Young, *Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 6th Edition, 1989.
3. L. O. S. Ferreira, F. Pourlborz, P. Ashar, and C. Khan-Malek, "Torsional Scanning Mirrors Actuated by Electromagnetic Induction and Acoustic Waves", *International Conference on Microelectronics and Packaging-ICMP'98*, Curitiba, PR, Brazil, Aug/98.
4. L. O. S. Ferreira and S. Moehlecke, "A silicon micromechanical galvanometric scanner", *Sensors and Actuators - A*, Vol.73, No.3, 252-260, March, 1999.

## Capítulo 3

# O CIRCUITO DE ACIONAMENTO (ESTATOR)

---

### 3.1 O PROJETO

O estator deverá fornecer um campo magnético constante  $B_1 = 1600 \text{ Gauss}$  e um campo magnético pulsante  $B_2 = 150 \text{ Gauss}$ . Suas dimensões externas são  $30 \times 100 \times 110 \text{ mm}^3$ .

Nos estudos e pesquisas realizados sobre circuitos magnéticos foi encontrado um modelo de circuito <sup>[1]</sup> que mostrou ser muito interessante para ser aplicado no acionamento do scanner indutivo. Este circuito é do tipo ferro-móvel como mostra a fig. 3.1. A geometria foi adaptada para a aplicação no acionamento do scanner que é do tipo bobina-móvel. As alterações na geometria são mostradas na fig. 3.2.

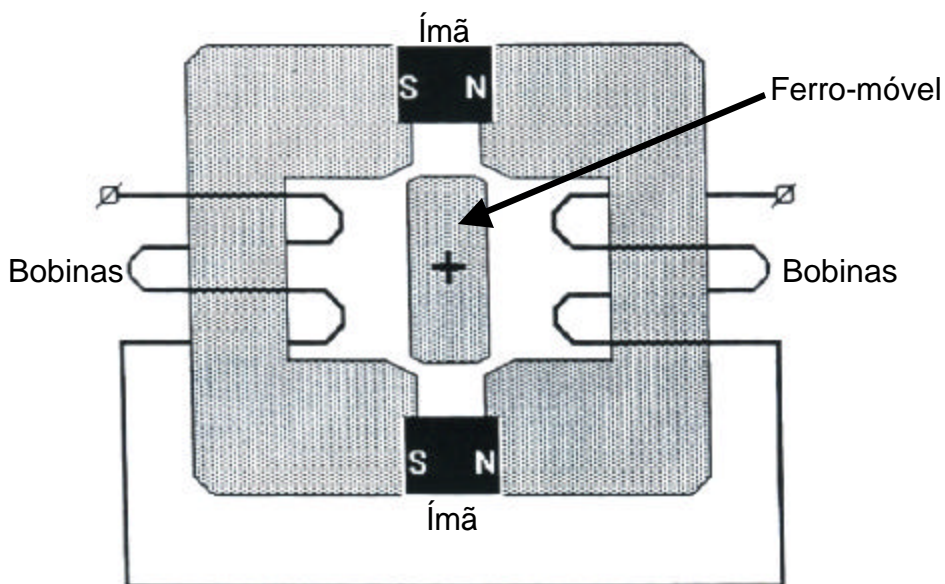


Figura 3.1 – Modelo para o circuito magnético [1].

Partindo do modelo de circuito mostrado na fig. 3.1 foram feitas as modificações necessárias para a aplicação no acionamento do scanner.

Para que houvesse um melhor acoplamento entre o estator e a bobina do rotor foi projetado um circuito magnético com um entreferro pequeno (3 mm). Este modelo possui peças polares que avançam em direção ao centro do circuito, que é a região da bobina do rotor do scanner. A fig. 3.2 mostra o modelo do circuito de acionamento do scanner.

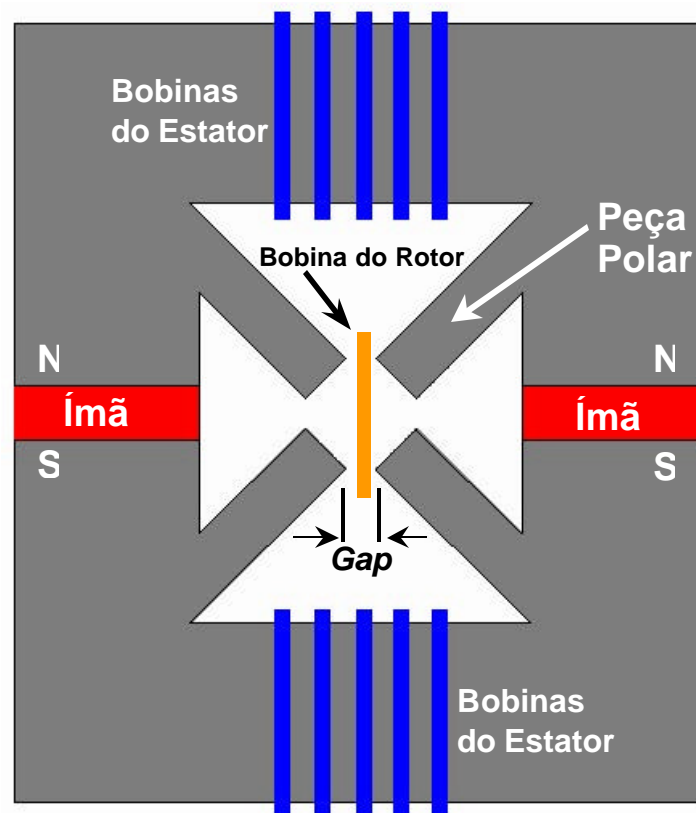


Figura 3.2 – Modelo do circuito de acionamento do scanner.

A seguir é apresentado este circuito mostrando-se os fluxos magnéticos.

Foi feito um modelo analítico simplificado a parâmetros concentrados à base de relutâncias magnéticas (fig. 3.3). Ele serviu para dar uma primeira avaliação da influência dos campos magnéticos na região de interesse. As direções e os fluxos resultantes mostrados na fig. 3.3 são para um dado instante de tempo  $t$ . Visto que o sinal aplicado às bobinas é senoidal o fluxo magnético produzido por elas é alternado. Portanto, os fluxos resultantes mudam de direção de acordo com o sinal aplicado.

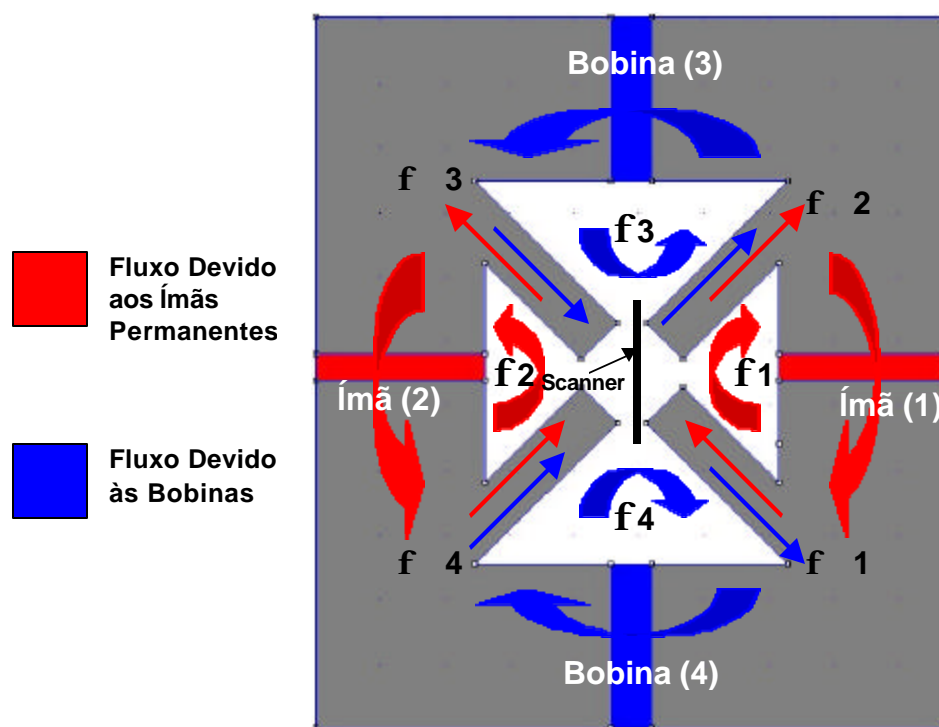


Figura 3.3 – Fluxos no circuito magnético.

Onde:

$f_1$  = Fluxo devido ao campo magnético do ímã permanente1

$f_2$  = Fluxo devido ao campo magnético do ímã permanente2

$f_3$  = Fluxo devido ao campo magnético da bobina 3

$f_4$  = Fluxo devido ao campo magnético da bobina 4

$f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  e  $f_4$  são os fluxos resultantes nos ramos 1, 2, 3 e 4.



Os fluxos resultantes para o modelo foram:

$$f_1 = f_4 - f_1$$

$$f_2 = f_1 + f_3$$

$$f_3 = f_2 - f_3$$

$$f_4 = f_2 + f_4$$

Estes resultados serviram como uma primeira estimativa dos campos magnéticos que atravessam a região da bobina do rotor do scanner.

Este modelo de circuito magnético foi simulado em computador, como mostra a etapa seguinte.

## 3.2 A SIMULAÇÃO

O modelo de circuito apresentado na seção anterior foi desenhado com o software *AutoCad*, tendo dimensões externas de 100 mm x 110 mm. O desenho com suas dimensões foi exportado para o simulador de circuitos magnéticos por elementos finitos *FEMM (Finite Element Method Magnetics)*.

Entra-se com os dados do tipo de material do núcleo que se quer simular, sendo neste caso, o aço-silício. O programa possui uma biblioteca com as propriedades eletromagnéticas de diversos materiais usados como núcleo. Em seguida definem-se as áreas que serão os ímãs permanentes de  $N_p F_p B$  e as áreas que serão as bobinas do circuito, geradoras do campo alternado.

O circuito magnético projetado (estator) consiste em 2 partes simétricas acopladas por ímãs permanentes. Em cada parte são colocados dois conjuntos de bobinas, os quais vão gerar o campo magnético alternado. Os ímãs permanentes geram o campo magnético permanente (figs. 3.2 e 3.3).

Após entrar com os dados no programa escolhe-se a região de interesse a qual, neste caso, é o centro aonde vai se localizar a bobina do scanner. O resultado da simulação mostra a quantidade de fluxo que atravessa a região escolhida e se esse fluxo vai ou não saturar o núcleo de ferro. A fig. 3.4 mostra a simulação do circuito magnético e a densidade de fluxo na região de interesse (ao centro).

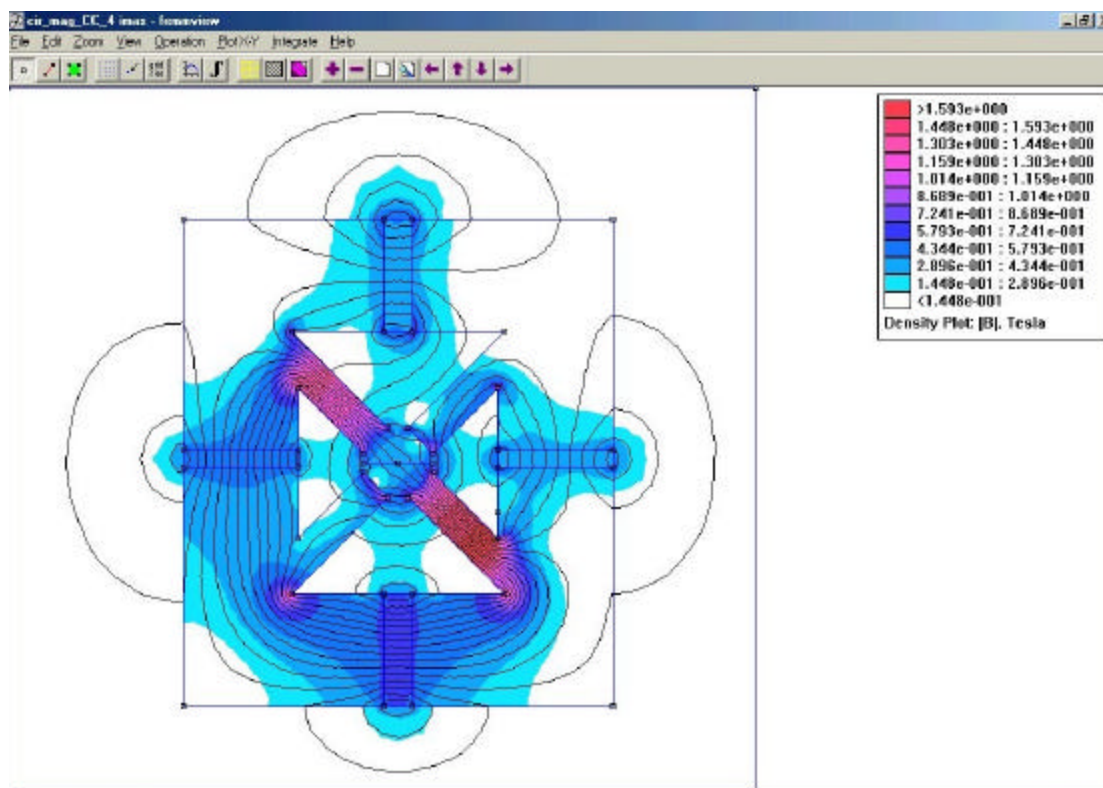


Figura 3.4 – Resultado da simulação do circuito magnético no *FEMM*.

Foram realizadas 5 simulações diferentes com pequena variação na geometria de uma para a outra. Estas variações se concentraram nas peças polares, para verificar o fluxo que atravessa esta região.

A geometria mostrada na fig. 3.4 foi a que apresentou o melhor resultado dentre as simulações.

A simulação mostrou um campo magnético de valor elevado na região onde se deseja induzir uma tensão na bobina do scanner, o que significa que este modelo de circuito magnético atende seu propósito. A simulação serviu também para mostrar que as dimensões usadas no circuito magnético não iriam deixar que o núcleo de ferro se saturasse prejudicando o fluxo magnético.

A seção seguinte trata da confecção e caracterização do estator.

### 3.3 CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

O circuito magnético foi fabricado com chapa de ferro-silício [2] de 0,3 mm de espessura. Elas foram cortadas segundo o modelo apresentado na seção anterior e empacotadas até ficarem com uma largura de 30 mm. Foram enroladas 4 bobinas [3] de 80 voltas cada (2 em cada parte simétrica do circuito) com fio #30 AWG com verniz isolante.

As duas partes foram acopladas com 4 ímãs permanentes (2 de cada lado) e fixadas sobre uma base de acrílico por meio de uma chapa em L e parafusos (fig. 3.5). O circuito depois de montado ficou com 30 x 100 x 110 mm.

Com um gaussímetro portátil da F.W. Bell foram medidos os campos paralelo  $B_1$  gerado pelos ímãs permanentes e alternado  $B_2$  gerado pelas bobinas. O campo paralelo medido no centro do entreferro foi de 600 Gauss para 4 ímãs de  $\text{NdFeB}$  de 9,52 x 6,35 x 25,4 mm cada. Aplicando uma tensão senoidal de 60 Hz nas bobinas mediu-se um campo alternado de 80 Gauss no centro do entreferro.

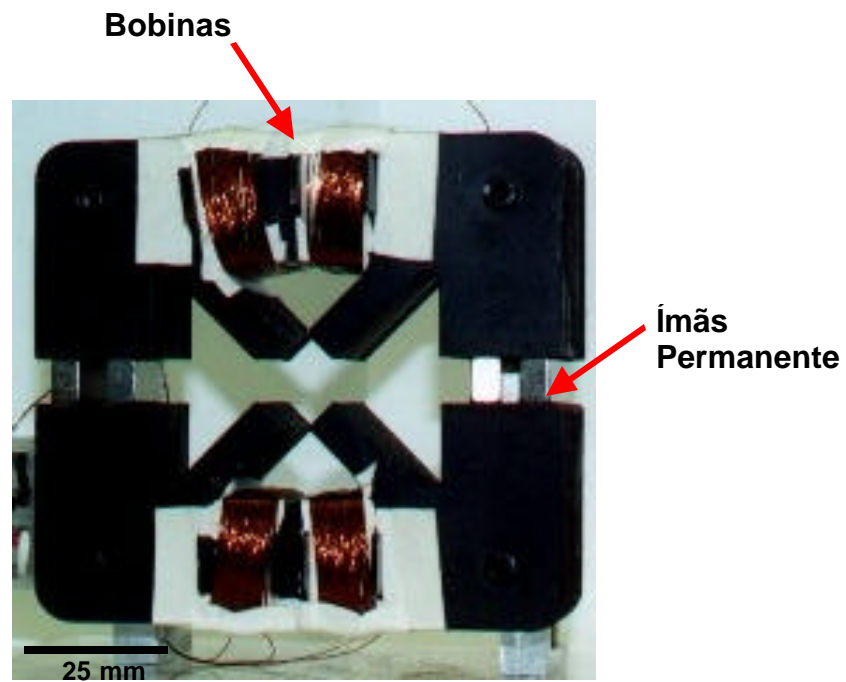


Figura 3.5 – Foto do circuito magnético fabricado.

A seção seguinte trata dos testes com protótipo em PCB apresentado no cap. 2.

### 3.4 TESTES COM O PROTÓTIPO EM PCB

O dispositivo foi inserido no circuito magnético (fig. 3.6) e foram medidas a amplitude da resposta em frequência e a frequência de ressonância.

A resistência elétrica da bobina foi medida com um multímetro de modelo 34401A da AGILENT, e seu valor foi 0,015 Ohm. Este valor é considerado bom, pois quanto menor a resistência maior a corrente e por consequência maior o torque gerado, conforme modelo matemático.

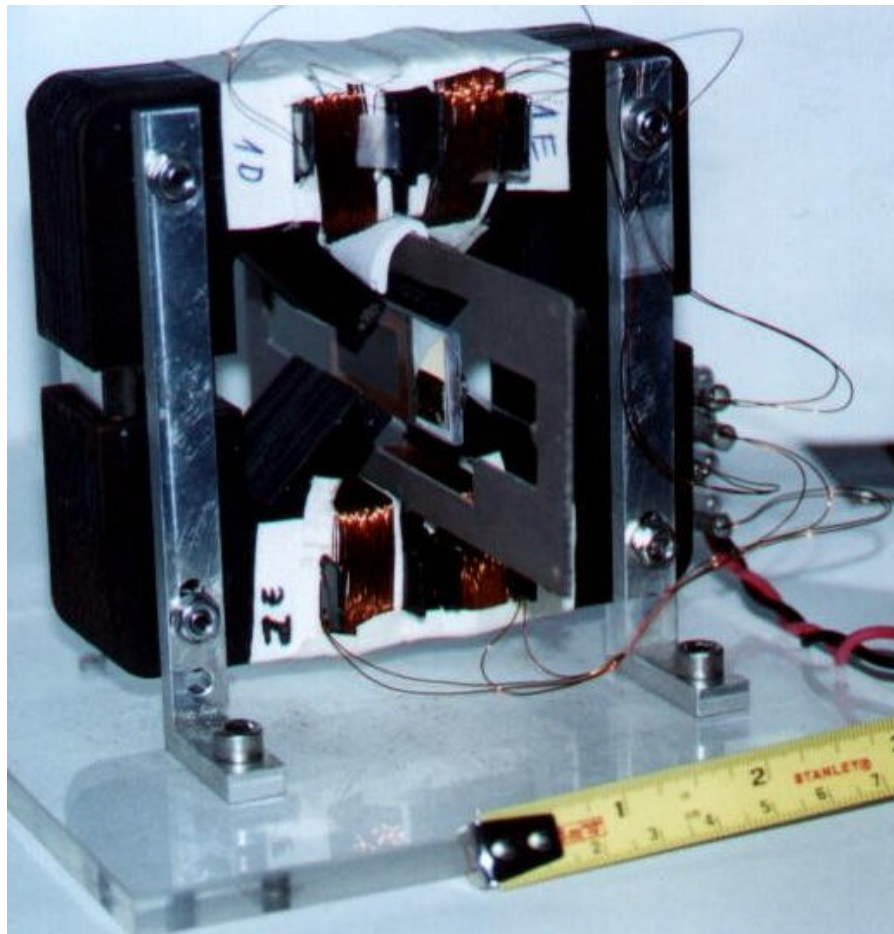


Figura 3.6 – Foto do protótipo inserido no estator.

O protótipo atingiu um ângulo de deflexão do rotor de quase 9° pico-a-pico na frequência de ressonância de aproximadamente 58 Hz (fig. 3.7) para um  $B_1$  de 600 Gauss e campo magnético pulsante  $B_2$  de 80 Gauss, fornecidos pelo circuito magnético.

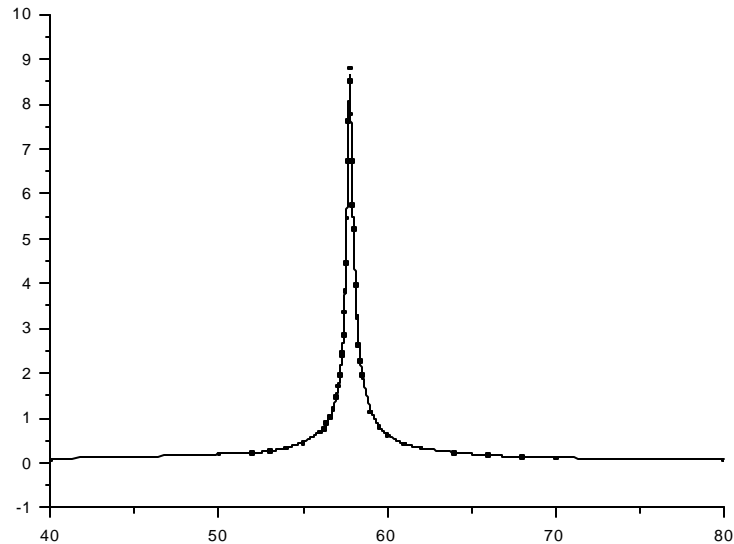


Figura 3.7 – Amplitude da resposta em frequência do protótipo em PCB.

Devido aos ímãs permanentes disponíveis e a limitação de potência da fonte de alimentação das bobinas não foi possível atingir os campos

Tendo sido caracterizado e testado o circuito magnético com o scanner em PCB a etapa seguinte consistiu na miniaturização do scanner. O scanner miniaturizado foi feito em silício utilizando-se técnicas de microfabricação.

O capítulo 4 descreve o processo de microfabricação do scanner indutivo de silício.

## REFERÊNCIAS

1. Yu. Larchenko, A. Leonov and S. Zhook, "Estimation of maximum speed of eletromechanical deflectors of light", *Proceedings of SPIE*, San Jose, CA, USA, Vol. 2383, 470-478, 1995.
2. C. Wm. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, Marcel Dekker Inc., New York, NY, USA, 2nd Edition, 1988.
3. L. Bessonov, *Applied Electricity for Engineers*, MIR Publishers, Moscow, URSS, 2nd Edition, 1973.

---

---

melhorado ou modificado para produzir estruturas tridimensionais pequenas com dimensões que variam dos centímetros aos sub-microns. Envolvendo sensores, atuadores entre outros microcomponentes e microsistemas <sup>[1]</sup>.

A primeira etapa da microfabricação é a litografia, que é a técnica usada para transferir cópias de um padrão mestre para a superfície de um material sólido, como uma lâmina de silício, por exemplo. A forma mais utilizada de litografia é a chamada fotolitografia.



Para a construção do scanner miniaturizado foi desenvolvido um novo processo de microfabricação, o qual foi chamado de **Si-LiG**. Este processo une a litografia profunda e eletroformação de metal com a microusinagem química de substrato de silício em solução aquosa de KOH (Hidróxido de Potássio). A técnica de compensação de cantos convexos foi aplicada na microusinagem do dispositivo.

Na microfabricação do scanner indutivo de silício foram utilizadas lâminas de Si (100) DSP (*Double Side Polished*) de 2" de diâmetro e  $200 \pm 25 \mu\text{m}$  de espessura, com um filme de  $1,20 \mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  crescido termicamente nas duas faces.

A seção seguinte trata das máscaras litográficas.

## 4.2 CONFEÇÃO DA MÁSCARA LITOGRÁFICA

O primeiro passo no processo de microfabricação do dispositivo é a confecção da máscara litográfica. Ela contém o formato do dispositivo que se quer transferir para a lâmina de silício. O desenho foi feito com o software *AutoCad*. A máscara foi fabricada pelo processo de escrita direta por feixe de elétrons (*Electron Beam*) sobre substrato de vidro com filme fino de Cr. A fig. 4.1 mostra o desenho das máscaras litográficas.

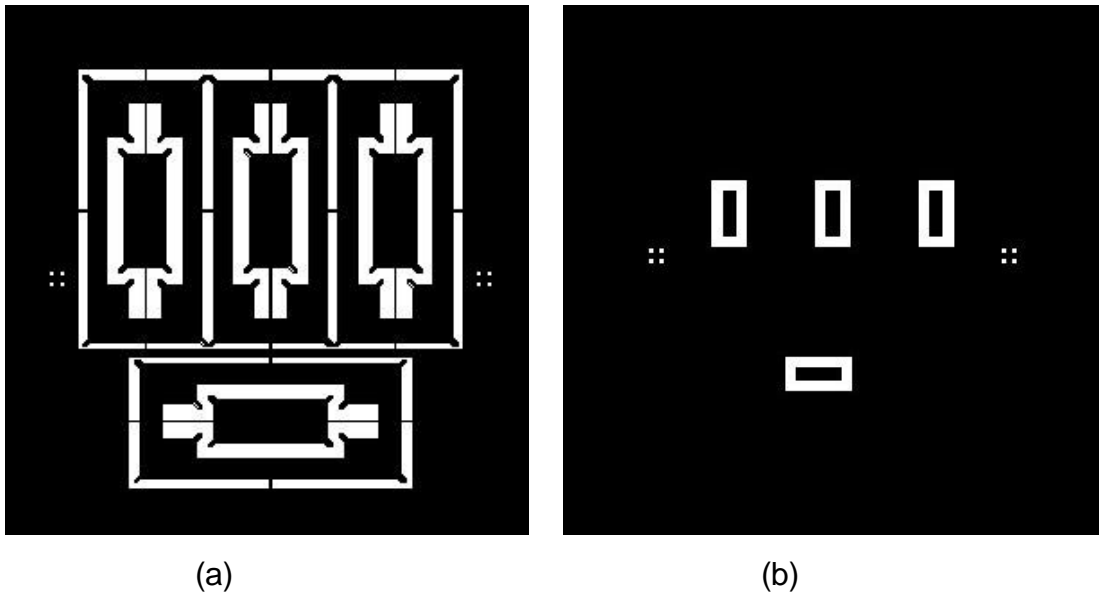


Figura 4.1 – (a) Desenho da máscara das janelas de corrosão e (b) Desenho da

O jogo de máscaras fabricado é composto por 2 máscaras. O primeiro nível foi chamado de “janelas de corrosão” e o segundo nível de “bo

A máscara possui 4 scanners idênticos e foi dimensionada de forma a se produzir o maior número de dispositivos em uma lâmina de silício de

No projeto da máscara foi previsto o problema de erosão de cantos convexos em microusinagem química de Si (100) por solução aquosa de KOH.

A lado da máscara foi alinhado com a direção  $\langle 110 \rangle$  do Si para se obter cavidades retangulares.

A seção seguinte trata da compensação de cantos.

## O DE CANTOS

A erosão de cantos convexos é um grande problema na corrosão anisotrópica de silício (100) (microusinagem química).

Para resolver este problema foram adicionadas à máscara do scanner estruturas de compensação de cantos (fig. 4.2). Tais estruturas possibilitam a obtenção de cantos perfeitamente definidos, o que garante a geometria desejada <sup>[2]</sup>.

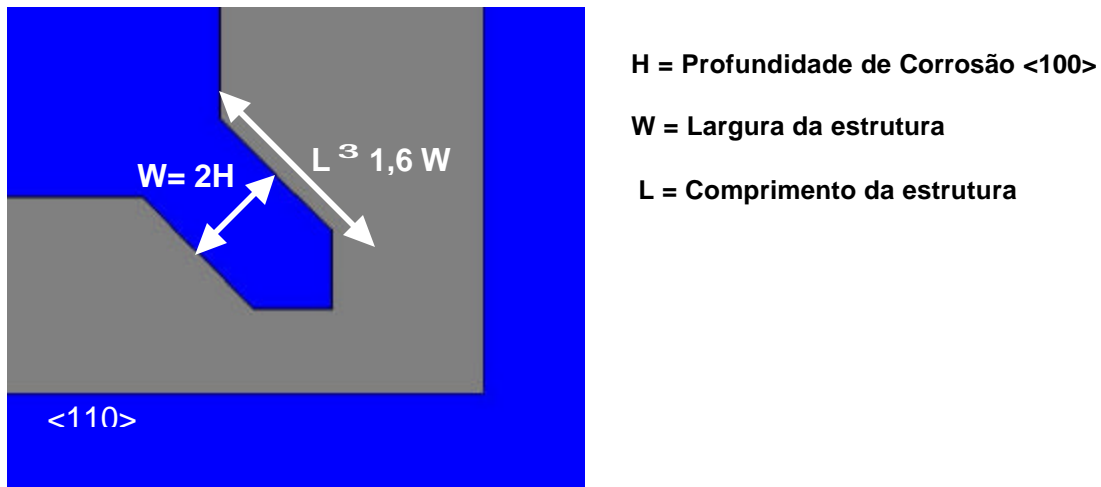


Figura 4.2 – Estrutura de compensação tipo haste inclinada.

As estruturas tipo haste inclinada foram adicionadas a todos os cantos convexos do dispositivo, como pode ser visto na fig. 4.3.

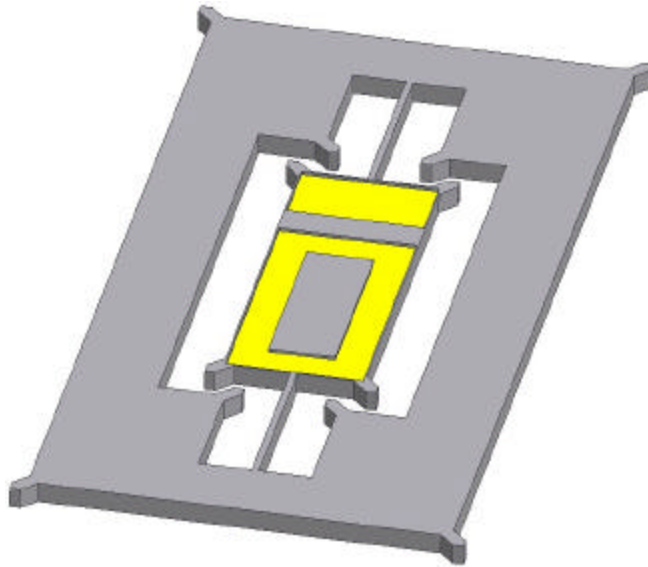


Figura 4.3 – Desenho do dispositivo com as estruturas de compensação.

No **Apêndice A** a erosão de cantos é tratada em detalhes.

A seção seguinte descreve o processo Si-LiG.

### 4.3 O PROCESSO Si-LiG

O processo de microfabricação desenvolvido para a construção do scanner foi chamado de **Si-LiG**. Este processo une a litografia profunda e eletroformação de metal com a microusinagem química de substrato de silício

Para se conceber sistemas indutivos que apresentem bom desempenho é necessário que o induzido (bobina do rotor) apresente baixa resistência elétrica. A obtenção de estruturas metálicas com baixos valores trica requer camadas espessas de metal. Essas partes metálicas espessas são obtidas pela técnica de eletroformação.

Para a fabricação das partes estruturais o silício monocristalino é um ótimo material, porque apresenta excelentes propriedades como: elevada tensão de ruptura, baixo estresse, não sofre fadiga, apresenta baixa histerese, fácil metalização e fácil usinagem química <sup>[1,3]</sup>. Surgiu a necessidade de se desenvolver um processo que unisse silício e metal. Foi então desenvolvido o processo Si-LiG, que significa Litografia e Eletroformação sobre substrato de silício usinado quimicamente. A sigla LiG deriva da Tecnologia LIGA que é o acrônimo em alemão de Litografia, Eletroformação e Moldagem (Litografie, Galvanoformung, Abformung).

A tecnologia LIGA tem sido muito empregada na fabricação de estruturas espessas e de elevada razão de aspecto. Ela também é utilizada na fabricação de sistemas com partes móveis <sup>[4-6]</sup>.

O processo LIGA é baseado na litografia profunda por Raios-X utilizando radiação síncrotron, mas também pode ser feito por UV, que é o presente caso <sup>[7]</sup>.

### 4.3.1 ETAPAS PRINCIPAIS DO PROCESSO

#### 1. LITOGRAFIA PROFUNDA UV

Por meio da fotolitografia profunda Ultra Violeta abre-se as janelas no fotorresiste espesso, que foi aplicado sobre um filme fino de ouro depositado no substrato de silício que será usado como camada-semente. A camada-semente serve para dar início ao processo de eletroformação. Nesta etapa está pronta a fôrma para eletroformação de metal.

#### 2. ELETROFORMAÇÃO DE METAL

As bobinas são eletroformadas utilizando-se o processo eletrolítico, onde se usou um banho de ouro. A partir da camada semente o filme vai crescendo dentro da fôrma até preenchê-la. Esta etapa produz a parte elétrica do dispositivo, ou seja, o induzido.

#### 3. MICROUSINAGEM QUÍMICA

A microusinagem química ou corrosão anisotrópica de realizada em solução aquosa de KOH (Hidróxido de Potássio). Nesta etapa são definidas as partes estruturais do dispositivo, como o corpo,

A fig. 4.4 mostra as etapas do processo Si– LiG.

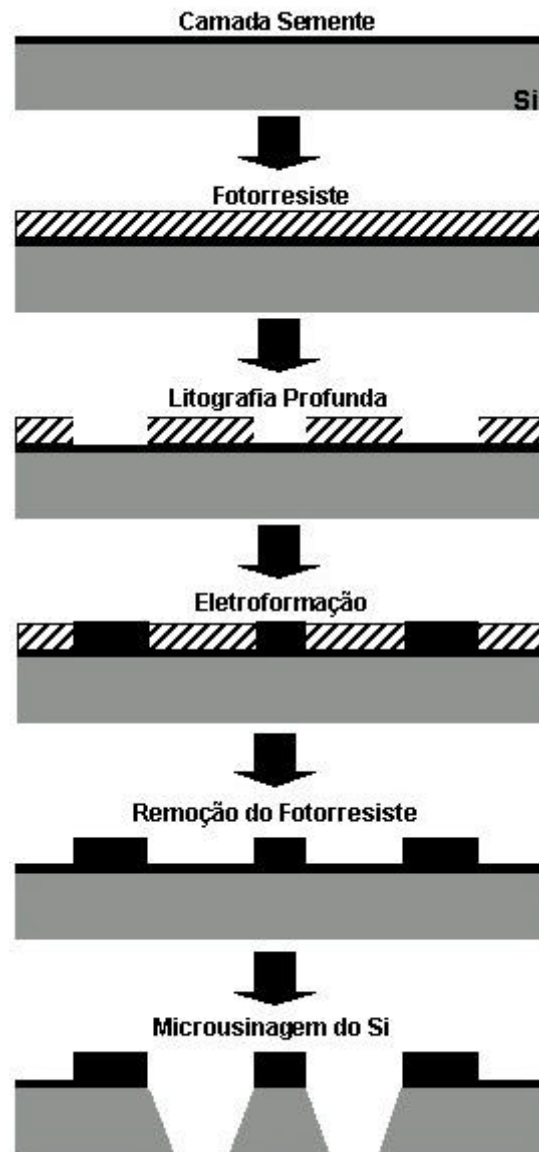


Figura 4.4 - Etapas do processo de microfabricação do scanner.

As etapas aqui descritas consistem das principais etapas do processo. O processo completo e detalhado é descrito no **Apêndice A**.

A seção seguinte trata da montagem do scanner.

### 4.3.2 MONTAGEM DOS DISPOSITIVOS

Após todas as etapas de fabricação, os dispositivos são destacados da lâmina de Si, montados e colados em um suporte de acrílico (frame) que serve para dar segurança no manuseio e também para encaixar o dispositivo no circuito magnético acionador. A fig. 4.5 mostra o scanner indutivo pronto visto de ângulos diferentes e montado na base.

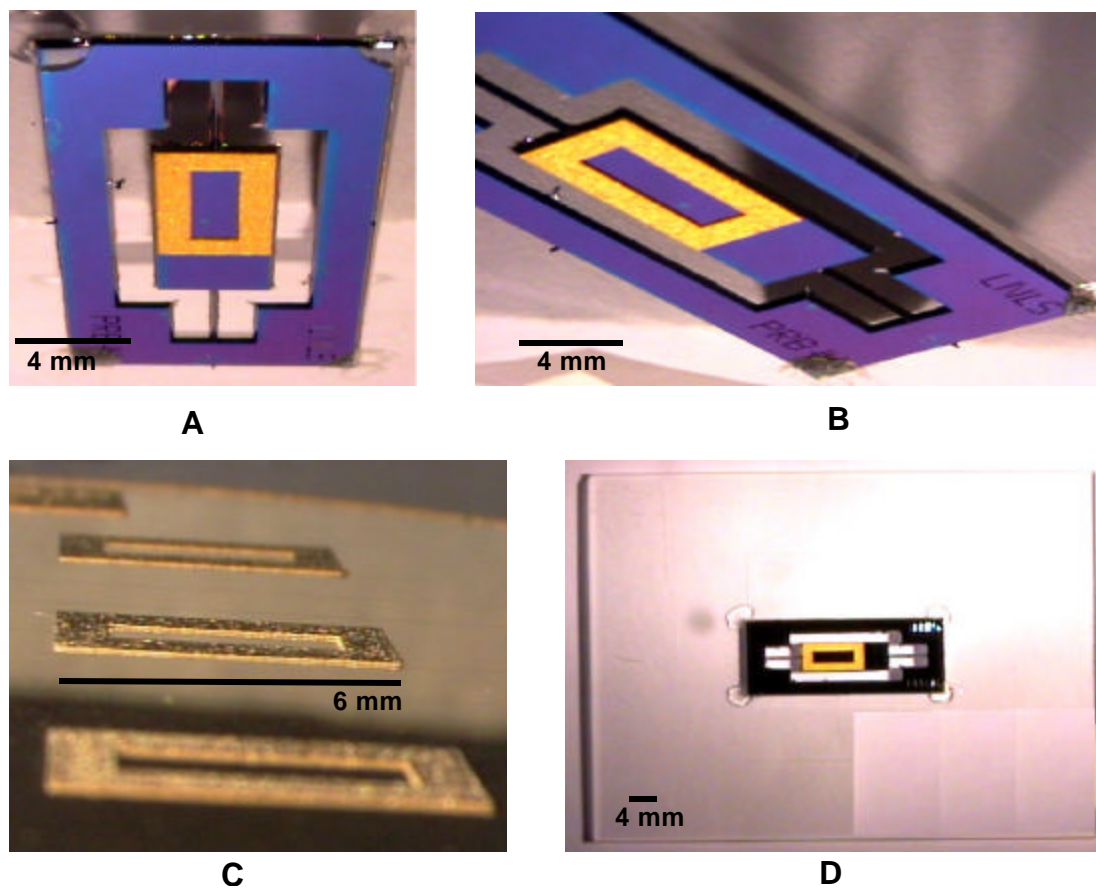


Figura 4.5 – Scanner Indutivo pronto, (A) e (B) vistas em ângulo, (C) bobinas eletroformadas em Au e (D) scanner montado no suporte de acrílico.

Agora o scanner indutivo está pronto para ser testado, o capítulo 5 trata dos testes e caracterização do dispositivo.



## REFERÊNCIAS

1. M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, New York, USA, 1st Edition, 1997.
2. H. L. Offereins, H. Sandmaier, K. Marusczyk, K. Kühl and A. Plettner, -cutting of (100) Silicon in KOH”, *Sensors and Materials* 3, (3), 127 - 144, 1992.
3. K. E. Petersen, “Silicon as a Mechanical Material”, *Proc. of IEEE* 70, (5), 420 - 457, 1982.
4. P. Bley, W. Bacher, W. Menz, J. Mohr “Description of Microstructures in LIGA – Technology”, *Microelectronic Engineering* 13, 509-512, 1991.
5. W. Ehrfeld, H. Lehr, “Synchrotron Radiation and the LIGA *Synchrotron Radiation News* 7, (5), 9 – 13, 1994.
6. W. Ehrfeld, H. Lehr “Deep X-Ray Lithography for the Production of Three-Dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics”, *Radiat. Phys. Chem.* 45, (3), 349-365, 1995.
7. R. K. Kupka, F. Bouamrane, C. Cremers, S. Megtert, “Microfabrication: LIGA-X and Applications”, *Applied Surface Science* 164, 97-110, 2000.

## Capítulo 5

# A CARACTERIZAÇÃO DO DISPOSITIVO

---

### 5.1 METROLOGIA

O primeiro passo na caracterização do scanner foi fazer a metrologia. As medidas das dimensões menores foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura modelo JSM-5900LV da JEOL (fig. 5.1). As dimensões maiores foram medidas em um microscópio óptico da INFINITY equipado com uma câmera de vídeo CCD colorida modelo XC-999 da SONY e adaptador de vídeo modelo *Meteor II* da MATROX (fig. 5.2).



Figura 5.1 – Microscópio eletrônico de varredura.



Figura 5.2 – Vídeo-microscópio com câmera CCD.

A aquisição das imagens do vídeo-microscópio foi feita pelo software *Inspector 3.1* da MATROX (fig. 5.3).

Para a realização das medidas foi utilizado o software *Image Tool* (fig. 5.4). Este software faz medidas em imagens a partir de uma calibração prévia com padrão conhecido.



A seguir são apresentadas as imagens das medidas realizadas no scanner indutivo. Primeiro as feitas no microscópio eletrônico (fig 5.5) e depois -microscópio (fig. 5.6).

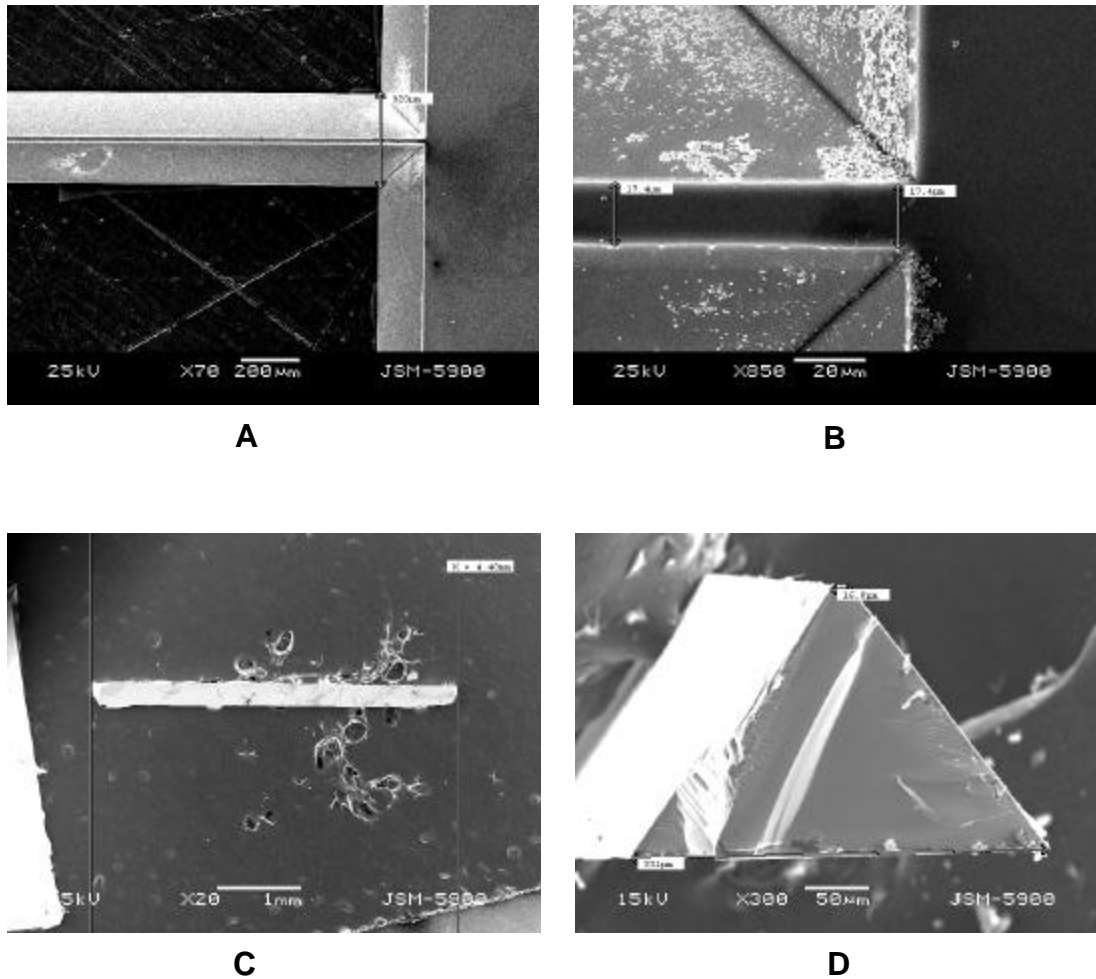
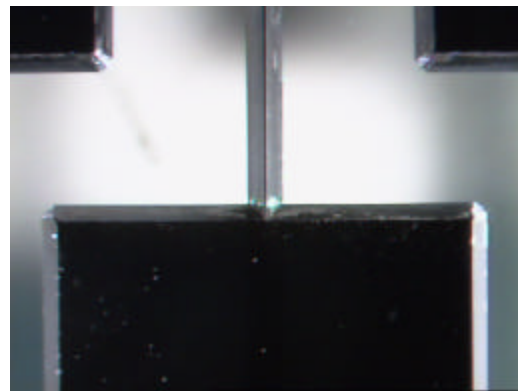


Figura 5.5– Micrografias do microscópio eletrônico.

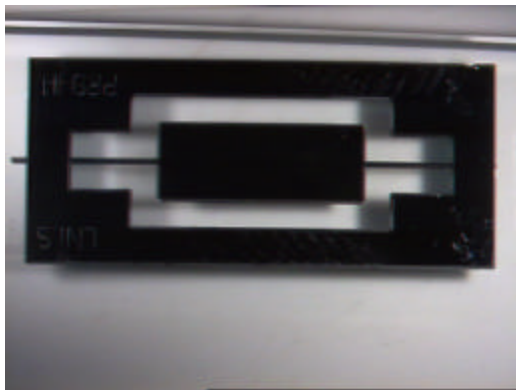
- (A) base da barra de torção,
- (B) topo da barra de torção,
- (C) comprimento da barra de torção,
- (D) seção transversal da barra de torção.



**A**



**B**



**C**



**D**

Figura 5.6— Fotografias do vídeo-microscópio.

- (A) comprimento do rotor,
- (B) largura do rotor,
- (C) comprimento do frame,
- (D) largura do frame.

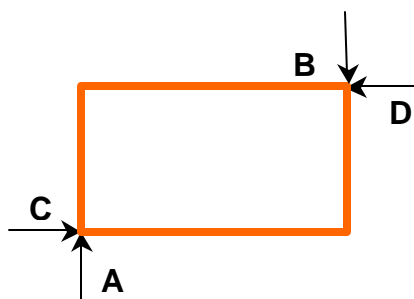
Agora os valores medidos são comparados aos valores projetados apresentados no cap. 2. A tab. 5.1 mostra esses valores.

Tabela 5.1 – Metrologia do scanner indutivo.

	<b>Medido [mm]</b>	<b>Projetado [mm]</b>	<b>Diferença Relativa [%]</b>
Topo da barra	17,4	30	- 42
Base da barra	320	312,8	+ 2,2
Comprimento da barra	4400	4500	- 2,2
Comprimento do rotor	9950	10000	- 0,5
Largura do rotor	3688	3700	- 0,3
Comprimento do frame	23900	24000	- 0,4
Largura do frame	9950	10000	- 0,5

A maior diferença relativa encontrada foi para a medida do topo da barra de torção. Este valor elevado pode ser devido à etapa de processo de abertura das janelas de corrosão no óxido de silício com solução buffer de HF. Por ser a linha mais fina do dispositivo ela pode ter sido proporcionalmente mais atacada pelo HF. Os outros parâmetros apresentaram pequena diferença relativa. Essas diferenças podem ser atribuídas em parte ao processo de fabricação e em parte à própria metrologia.

A seção seguinte trata da parte elétrica do dispositivo.



etro, tem-se o valor da resistência. Foram utilizados para as medidas uma fonte modelo E3632A da AGILENT e um multímetro modelo 34401A da AGILENT.



A fig. 5.8 mostra a posição das 4 bobinas de Au eletroformadas na

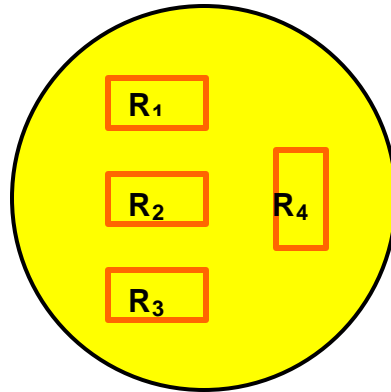


Figura 5.8 – Lâmina de Si com as 4 bobinas eletroformadas.

Valores medidos:

$$R_1 = 3,40 \text{ m}\Omega$$

$$R_2 = 3,00 \text{ m}\Omega$$

$$R_3 = 3,52 \text{ m}\Omega$$

$$R_4 = 3,20 \text{ m}\Omega$$

$$\text{Média} \rightarrow R = 3,28 \text{ m}\Omega$$

Essa pequena variação no valor das resistências na mesma lâmina pode ser devido ao fato da eletroformação das bobinas não ser absolutamente uniforme. Como podemos observar na fig. 5.9 que mostra uma vista lateral da bobina eletroformada.

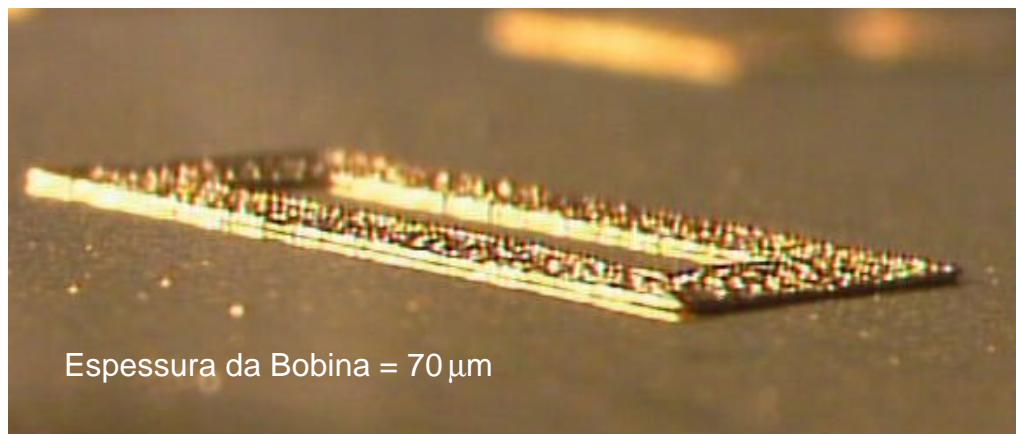


Figura 5.9 – Detalhe da bobina eletroformada em ouro.

O valor de resistência obtido ( $3,28 \text{ m}\Omega$ ) ficou muito além do valor estimado no dimensionamento que foi  $15 \text{ m}\Omega$ . Isto se deve à espessura da bobina ser maior que a estimada. Este valor de resistência permite que se induza uma maior tensão na bobina e conseqüentemente o dispositivo apresenta um maior ângulo de deflexão.

A seção seguinte apresenta os testes realizados com o dispositivo.

### 5.3 O DISPOSITIVO NO BANCO DE TESTE

Foi montado um banco de teste para o scanner indutivo. A base deste banco é uma plataforma antivibratória da NEWPORT sobre a qual foram fixados o scanner e seu circuito de acionamento, a fonte de laser e o detector de posição. O sistema montado pode ser visto na fig. 5.10.

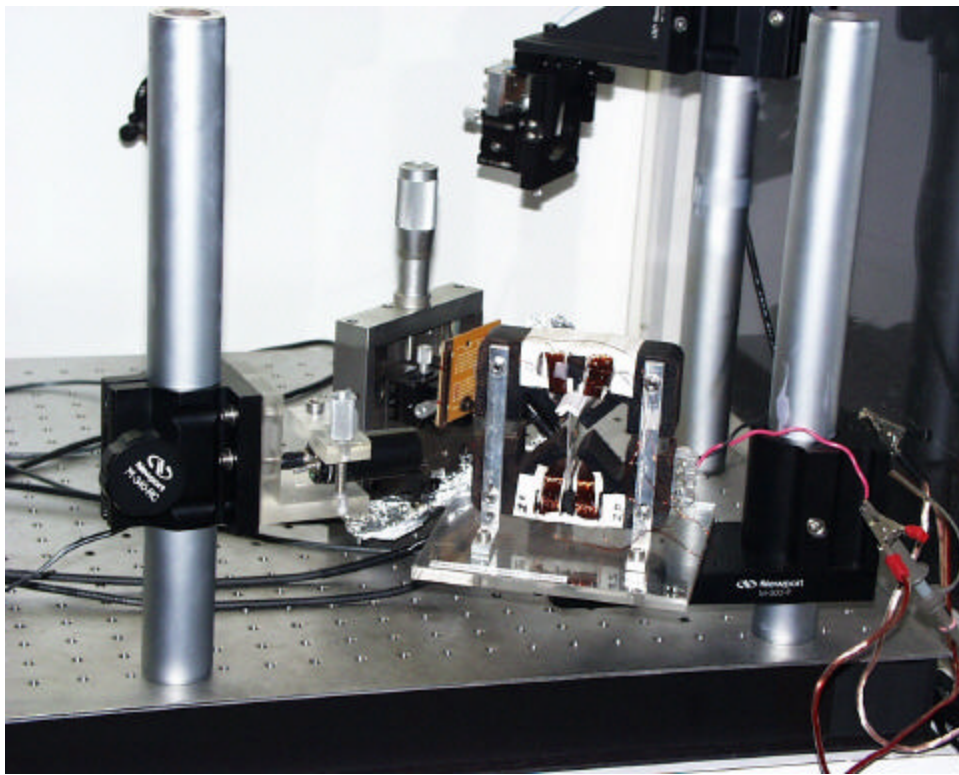


Figura 5.10 – Montagem do sistema no banco de teste.

$\mu$ PA1000 da STANER, que alimentam as bobinas do circuito magnético. A coleta de dados da resposta do dispositivo foi feita por um osciloscópio digital modelo TDS 460A da TEKTRONIX equipado com amplificadores diferenciais. Esses dados foram processados em um computador Pentium III de 733 MHz da DELL por meio de uma interface GPIB da HEWLETT-PACKARD e do software *VEE Pro 6.0*. A fig. 5.11 mostra o rack de equipamentos.



Figura 5.11 – Rack de equipamentos utilizados nas medidas.

A seguir é apresentado o sistema de testes do dispositivo.

O scanner varre o feixe de laser incidente em seu espelho sobre um sensor que detecta a posição do feixe. Este sensor gera um sinal que é captado em um osciloscópio e processado no computador, fornecendo desta forma, a amplitude e a fase da resposta em frequência do dispositivo. A fig. 5.12 mostra o diagrama do sistema de testes, que faz o acionamento e a coleta de dados.

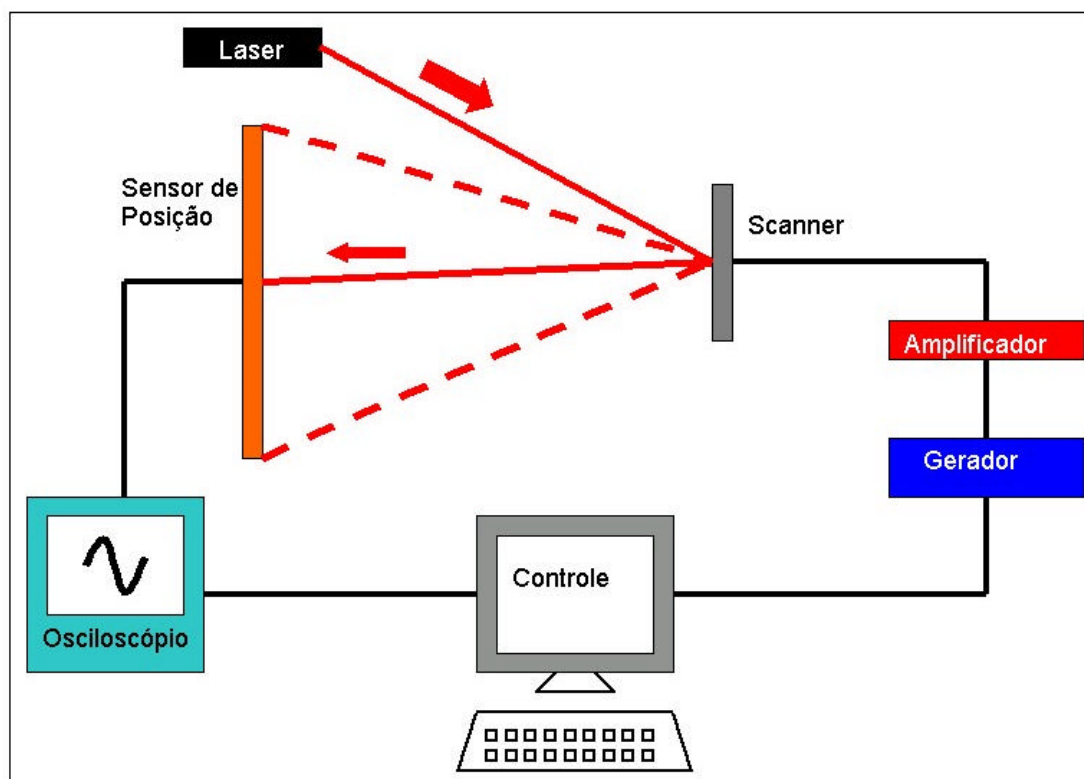


Figura 5.12 – Diagrama do sistema de testes do scanner.

A seguir é apresentado o software *VEE Pro 6.0* que processa e armazena os dados.

No software *VEE Pro 6.0* através de um programa desenvolvido especificamente para o scanner indutivo, faz-se o tratamento dos sinais coletados pelo osciloscópio as manipulações matemáticas necessárias para o armazenamento dos dados em planilhas. O usuário informa ao programa a faixa de amplitude e frequência do sinal que se deseja aplicar ao scanner. O programa capta a resposta do dispositivo para cada intervalo e armazena em um arquivo para ser analisado posteriormente. A fig. 5.13 mostra a janela do software com o programa utilizado.

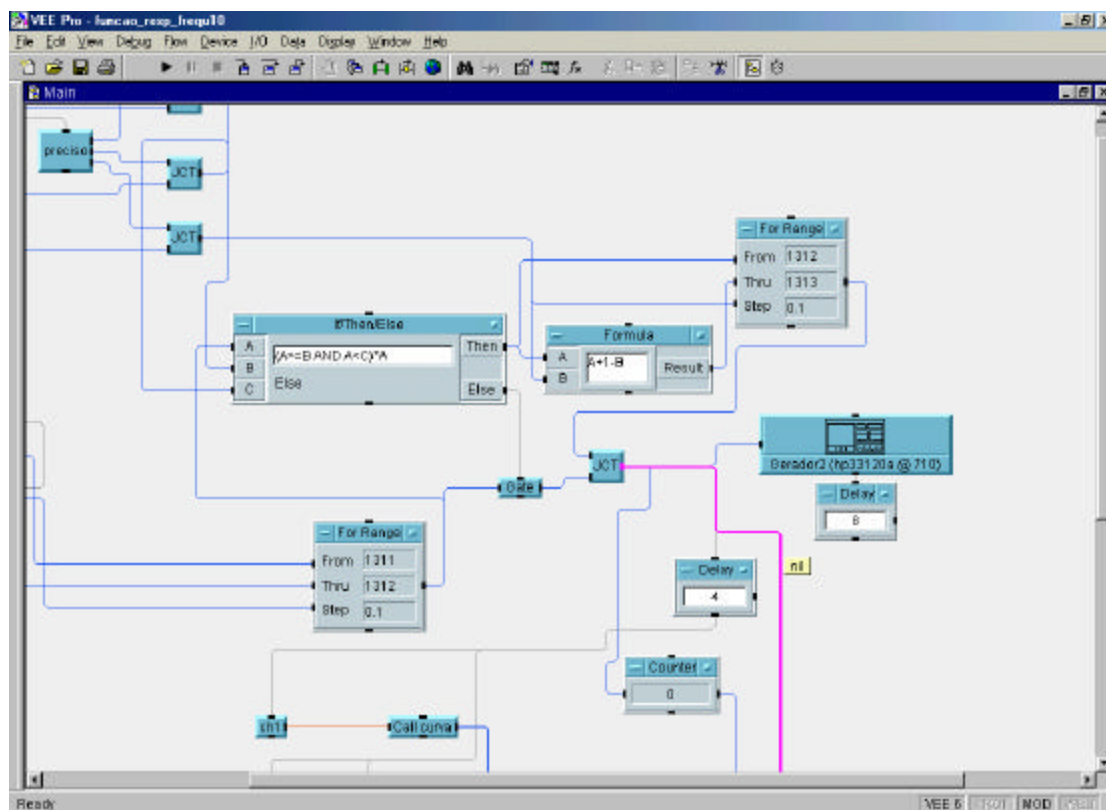


Figura 5.13 – Janela do software *VEE Pro 6.0* da Agilent Technologies.

A seguir são apresentadas as curvas da amplitude e da fase da resposta em

Foram levantadas as curvas da amplitude e da fase da resposta em frequência do scanner indutivo para uma faixa grande de frequência. As figs. 5.14 e 5.15 mostram as curvas para regiões próximas à ressonância.

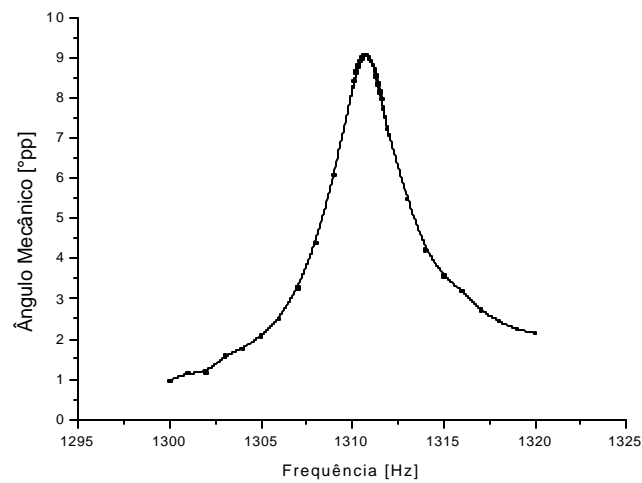


Figura 5.14 – Gráfico da amplitude da resposta em frequência.

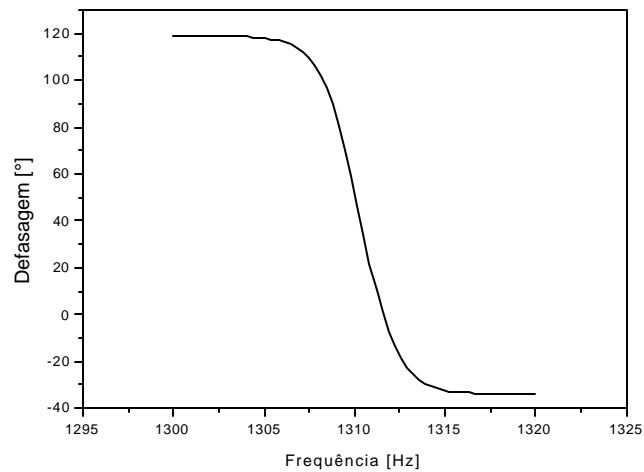


Figura 5.15 – Gráfico da fase da resposta em frequência.

O scanner indutivo apresentou ângulo máximo de deflexão do espelho de  $9,15^\circ$  mecânicos pico-a-pico na frequência de ressonância de 1311 Hz. Os ímãs permanentes do estator foram substituídos por outros mais potentes e a corrente nas bobinas foi aumentada. Para esta caracterização o estator apresentou um campo magnético paralelo  $B_1 = 1150 \text{ Gauss}$  e um campo magnético pulsante  $B_2 = 100 \text{ Gauss}$ , medidos com um gaussímetro portátil da F.W. Bell. O dispositivo apresentou um fator de qualidade  $Q = 402$ , o que mostra a grande seletividade de frequência.

A frequência projetada no dimensionamento apresentado no cap. 2 foi de 2000 Hz e a obtida no dispositivo fabricado foi de 1311 Hz. Isto se deve ao fato de que o modelamento matemático desprezava a massa da bobina de Au. Como a bobina eletroformada é espessa, sua massa, e portanto seu momento de inércia, não pode ser desprezada. O momento de inércia da bobina foi incluído no modelo matemático e foram simuladas no *MathCad 2000* as curvas teóricas de amplitude e fase da resposta em

As figs. 5.16 e 5.17 comparam as curvas teóricas com as experimentais.

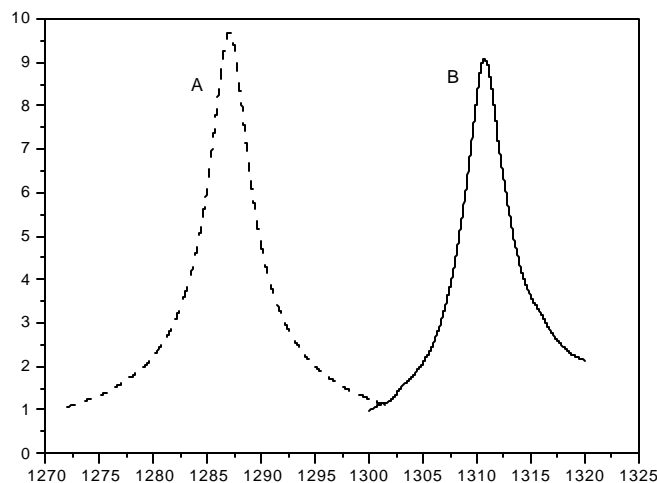


Figura 5.16 – Gráfico da amplitude da resposta em frequência.

Curvas: (A): teórica e (B): experimental.



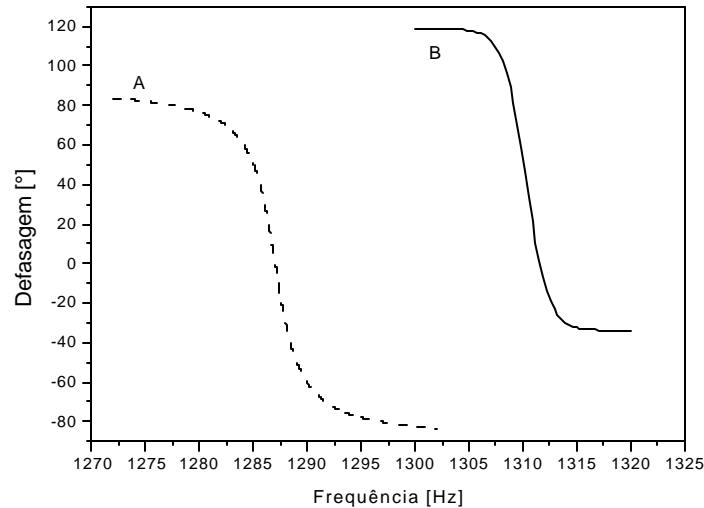


Figura 5.17 – Gráfico da fase da resposta em frequência.

Curvas: (A): teórica e (B): experimental.

A simulação do modelo com a bobina espessa no *MathCad 2000* para a resposta em frequência, mostrou que a ressonância ocorreria em 1287 Hz e o valor medido nos testes foi de 1311 Hz, o que mostra que este modelo descreve bem o dispositivo.

O deslocamento percebido na comparação das curvas simulada e experimental para a fase da resposta em frequência pode ser devido ao fato de o modelo ser para corrente e não para tensão, pois há uma diferença de fase entre corrente e tensão no circuito magnético devido à indutância das bobinas. Além disso, pode haver influência da histerese do circuito magnético na fase da resposta em frequência.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras sobre o trabalho.

# TIVAS FUTURAS

---

## 6.1 CONCLUSÕES

Foi projetado, microfabricado e caracterizado um defletor de luz de silício acionado por indução.

Uma metodologia de projeto e de processo de fabricação foi desenvolvida.

Um protótipo do scanner indutivo em tamanho aumentado foi feito em placa de circuito impresso e testado. Apresentou ângulo de deflexão mecânico -a-pico à frequência de ressonância de 58 Hz.

Um novo processo de microfabricação chamado **Si-LiG** foi desenvolvido para a construção do scanner indutivo de silício. O processo **Si-LiG** une a litografia profunda e eletroformação com a microusinagem química

O scanner microfabricado apresentou ângulo de deflexão mecânico do espelho de 9,15° pico-a-pico à frequência de ressonância de 1311 Hz. Este resultado é muito superior ao obtido por Ferreira et al., que foi de menos de -a-pico à frequência de 2200 Hz.

O fator de qualidade do dispositivo  $Q = 402$ , mostra a grande seletividade de frequência.

O acionamento do scanner por indução eliminou o problema de fadiga nas trilhas de alimentação, que ocorre em scanners galvanométricos. A do estator se mostrou adequada ao acinamento do dispositivo, mas precisa ser melhorada. O consumo de potência foi muito elevado. Um caminho para se diminuir este consumo é melhorando o acoplamento de fluxo entre estator e rotor.

O processo Si-LiG mostrou-se apropriado a microfabricação de atuadores indutivos porque uniu silício e metal de uma forma harmoniosa. A etapa de litografia resistiu muito bem à etapa seguinte de eletroformação e após a microusinagem química do Si a estrutura metálica permaneceu intacta. Neste processo aliaram-se as superiores propriedades do Si para a construção dos elementos estruturais com as excelentes propriedades elétricas dos metais para a construção do circuito de armadura. Se não fosse o processo Si-LiG não seria possível obtermos baixos valores de resistência elétrica que são alcançados por meio de estruturas espessas de metal, sem o qual a construção do dispositivo estaria comprometida. As estruturas de compensação de cantos convexos usadas na microusinagem do dispositivo permitiram obter geometrias bem definidas. Isto possibilitou um controle sobre a massa e um melhor aproveitamento da área do rotor.

O processo de fabricação é muito simples e necessita de apenas 2 máscaras litográficas. Por tal motivo, apresenta grande potencial para a produção de scanners a baixo custo, mas o custo ainda não foi calculado.

Foram estabelecidos procedimentos de metrologia utilizando microscópio eletrônico de varredura e microscópio óptico.

A utilização de um banco de testes com base antivibratória para a montagem do sistema e caracterização do dispositivo foi muito importante porque evitou problemas de vibração que poderiam ter interferido nas medidas.

A automação do sistema de medidas e aquisição de dados também foi importante porque trouxe mais confiabilidade e agilidade nas medidas.

O modelamento matemático deve ser aprimorado para que, dados o ângulo de deflexão e a frequência desejados, forneça o dimensionamento do dispositivo. Uma maneira de se fazer isso é realizando cálculos de forma interativa

Os resultados mostraram que o acionamento por indução tica é adequado a meso-sistemas, e é capaz de produzir scanners ressonantes com desempenho compatível com aplicações como leitores de código de barras e impressoras a laser, entre outros.

## 6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros, que poderiam complementar este trabalho:

- Miniaturizar o estator
- Modelagem da parte mecânica por elementos finitos
- Estudo da influência do atrito com o ar
- Sistema automático para controle da varredura
- Calcular custo de produção
- Aplicações

## Apêndice A

# O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DETALHADO

---

---

Neste apêndice são descritos o processo completo de microfabricação do scanner, a caracterização da microusinagem química e o uso das estruturas de compensação de cantos.

Na microfabricação do scanner foram utilizadas lâminas de Si (100) DSP (*Double Side Polished*) de 2" de diâmetro e  $200 \pm 25 \mu\text{m}$  de espessura, com um filme de  $1,20 \mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  crescido termicamente nas duas faces.

## A 1 O PROCESSO DE MICROFABRICAÇÃO

### A 1.1 ABERTURA DAS JANELAS DE CORROSÃO NO $\text{SiO}_2$

#### **Aplicação de promotor de aderência e cura:**

Promotor de aderência HMDS aplicado com pipeta e espalhado por centrifugação (spinner) a 800/5000 RPMs por 5/25 s.

A cura foi feita em chapa quente por 15 min a  $90^\circ\text{C}$ .

#### **Aplicação de Fotorresiste e cura:**

O fotorresiste S-1811 foi aplicado com uma seringa de vidro provida de filtro de  $0,22\mu\text{m}$  e espalhado por centrifugação (spinner) a 800/5000 RPMs por 5/25 s. A pré-cura em chapa quente foi de 5 min a  $90^\circ\text{C}$ .

Utilizando uma fotoalinhadora onde é colocada a máscara na qual contém o padrão que se quer transferir para o fotorresiste.

O tempo de exposição ao UV foi de 4 s para uma potência da 95 Watts.

**Revelação do fotorresiste exposto e limpeza:**

Revelador AZ-351 diluído em água (1:3) a 23°C por 30 s.

Lavagem da lâmina em água DI corrente por 3 min e secagem com jato de N<sub>2</sub>. Inspeção no microscópio para verificar a qualidade

**Proteção das costas da lâmina:**

Com um pincel macio foi aplicado o fotorresiste S-1811 em toda a superfície da lâmina para protegê-la da corrosão por HF. Fez-se uma cura desse fotorresiste em chapa quente por 10 min a 90°C.

**Corrosão do SiO<sub>2</sub>:**

Usando uma solução Buffer de HF em banho Maria a 30°C fez-se a corrosão do SiO<sub>2</sub> para abertura das janelas de corrosão com KOH. O SiO<sub>2</sub> de 1,25 µm de espessura levou 7 min para ser atacado pelo HF. A lâmina foi lavada em água DI corrente por 5 min e secada com jato de N<sub>2</sub>.

**Remoção do Fotorresiste:**

Com uma pisseta de Acetona faz-se a remoção grossa do fotorresiste e depois a lâmina é colocada em acetona fervente por 10 min para remover todos os resíduos.

**Limpeza Completa:**

A lâmina é submetida a uma nova Acetona fervente por 10 min e também ao Isopropílico fervente por 10 min e depois seca com jato de  $N_2$ .

**A 1.2 METALIZAÇÃO DA BOBINA****Metalização da face frontal da lâmina:**

A metalização foi feita pelo método de Feixe de Elétrons (E-Beam). Primeiro fez-se um filme de Ti de 200 Å de espessura (camada de adesão) e depois um filme de Au de 2000 Å de espessura (seed layer).

**Aplicação de promotor de aderência:**

Promotor de aderência HMDS aplicado com pipeta e espalhado por centrifugação (spinner) a 2000 RPMs por 30 s.

Não foi feita cura, apenas espera de 1 min.

**Espalhamento de Fotorresiste espesso e cura:**

Aplicação do Fotorresiste AZ-4620 e espalhamento por centrifugação (spinner) a 200/1000 RPMs por -cura em chapa quente foi feita em duas etapas: a primeira com rampa de 40 a 90°C por 15 min e a segunda a 90°C por 60 min.

**Exposição do Fotorresiste ao UV (máscara das bobinas):**

Utilizando uma fotoalinhadora onde é colocada a máscara que contém o padrão das bobinas que se quer transferir para o fotorresiste. O tempo de exposição ao UV foi de 240 s para uma potência da lâmpada 195 Watts.



Lavagem da lâmina em água DI corrente por 3 min e secagem com jato de  $N_2$ . A espessura do fotorresiste foi medida com um  $\mu m$ .

#### **Eletroformação das Bobinas de Au:**

Foi utilizado um Banho de Ouro neutro AURUNA 552-A na temperatura de 70°C. Calculou-se a densidade de corrente por área a ser eletroformada. A área total das bobinas é de 120 mm<sup>2</sup> e a densidade usada foi 350 mA / dm<sup>2</sup>, a corrente calculada e usada foi 42 mA e o tempo de eletroformação foi de 60 min. A espessura final ficou em 70  $\mu m$  medida com micrômetro digital.

#### **Remoção do Fotorresiste e limpeza:**

Com uma pisseta de Acetona faz-se a remoção grossa do fotorresiste e depois a lâmina é colocada em acetona fervente por 10 duos.

#### **Remoção do Filme de Au e Ti (seed layer):**

Foi utilizada uma solução comercial para corrosão de Au em temperatura ambiente com agitação por 90 s, e foi inspecionado no microscópio. O filme de Ti foi corroído com solução de HF a 10% na temperatura ambiente por 3 s, a lâmina foi lavada em água DI corrente por 5 min e secada com jato de  $N_2$  e inspecionada no microscópio.

### **A 1.3 MICROUSINAGEM QUÍMICA**

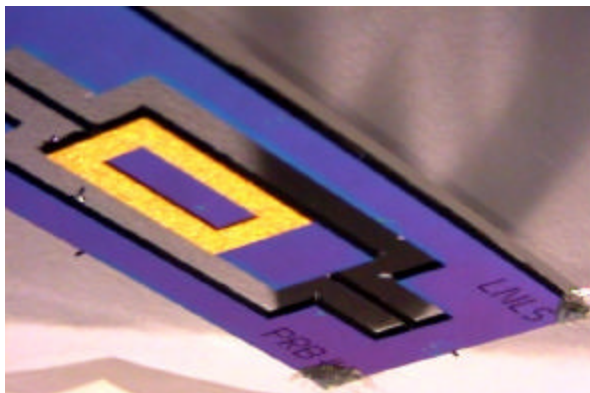
A corrosão do silício (microusinagem química) foi feita em solução aquosa de KOH a 28,52% (titulada) em um reator de vidro com controle automático de temperatura mantida em 80°C. A lâmina de Si é submetida ao HF (10%) por alguns segundos para remoção da camada de óxido nativo que se forma na superfície. A lâmina foi lavada em água DI e seca com jato de N<sub>2</sub>.

### **A 1.4 METALIZAÇÃO DO ESPELHO**

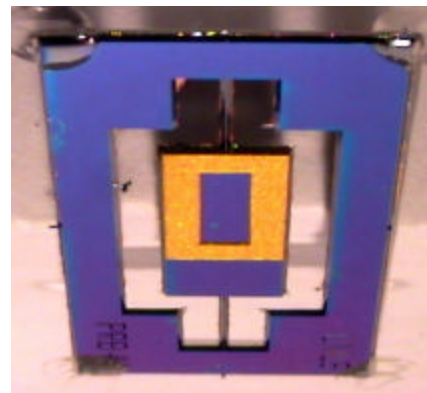
Depositou-se um filme de Al por Evaporação nas costas da lâmina toda para servir de espelho para o laser. Utilizou-se uma evaporadora de filamento. O filme ficou com uma espessura de 1485 Å e levou 5 min para ser depositado.

### **A 1.5 MONTAGEM DOS DISPOSITIVOS**

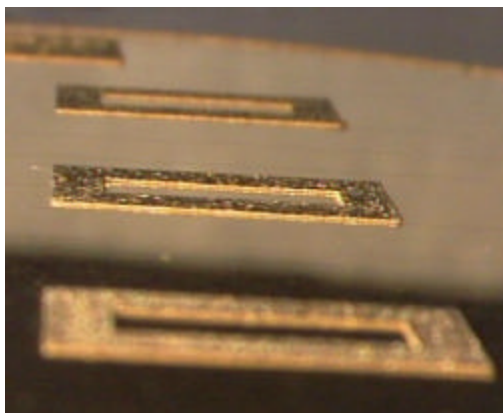
Após todas as etapas de fabricação, finalmente os dispositivos são destacados da lâmina de Si, montados e colados em um suporte de acrílico (frame) que serve para dar segurança no manuseio e também para encaixar o dispositivo no circuito magnético acionador. A fig. A1 mostra o dispositivo fabricado.



**A**



**B**



**C**



**D**

Figura A1 – Scanner Indutivo fabricado, (A) e (B) vistas em ângulo, (C) bobinas eletroformadas em Au e (D) scanner montado no suporte de acrílico.

Para que os resultados fossem padronizados, decidimos que todas as soluções de KOH utilizadas seriam tituladas para se conhecer suas concentrações exatas. Foi usado o método volumétrico de titulação -base para determinar a concentração de KOH para c utilizada no experimento. A fig. A2 mostra a lâmina de Si sendo corroída e a fig. A3 mostra os equipamentos utilizados para a microusinagem.



Figura A2 – Corrosão de Si.



Figura A3 – Reator de vidro e Banho Termostático.

A taxa de corrosão do Si em função da concentração de KOH é mostrada na tabela A1 e também pelo gráfico da fig. A4.

Tabela A1 - Taxa de corrosão versus concentração.

Concentração de KOH (% em massa)	Taxa de Corrosão (mm/min)
21,62	1,425
25,50	1347
28,52	1,306
33,95	1,173
39,85	0,983
46,66	0,814

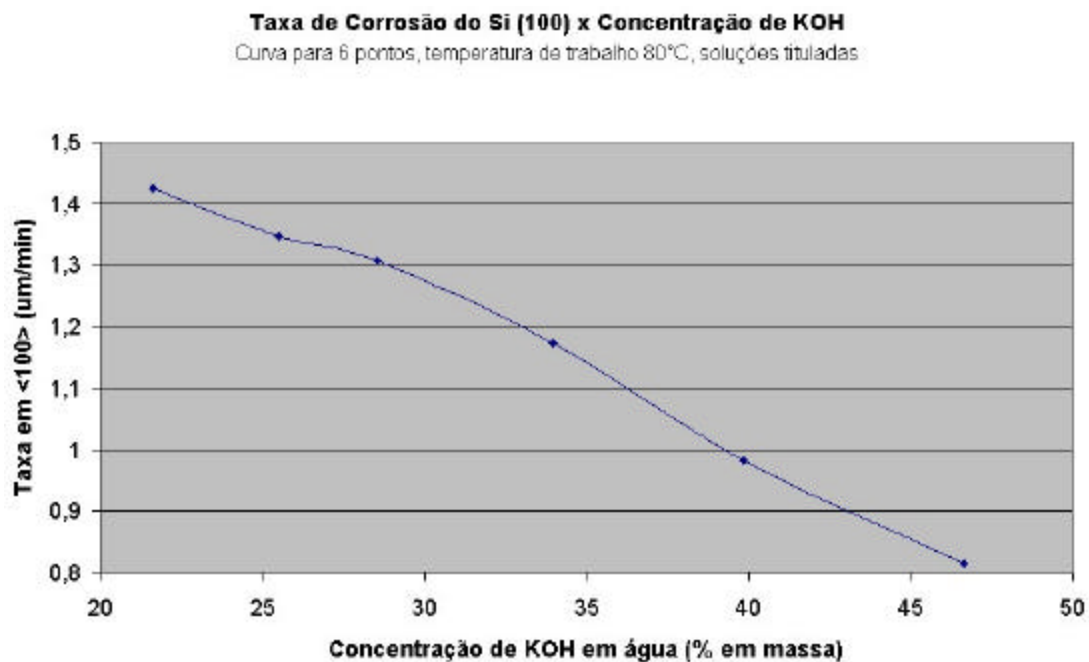


Figura A4 – Curva da taxa de corrosão do Si versus concentração de KOH.

As microusinagens com maior taxa de corrosão resultavam em superfícies de paredes laterais mais rugosas que as de menor taxa, como mostra a fig. A5.

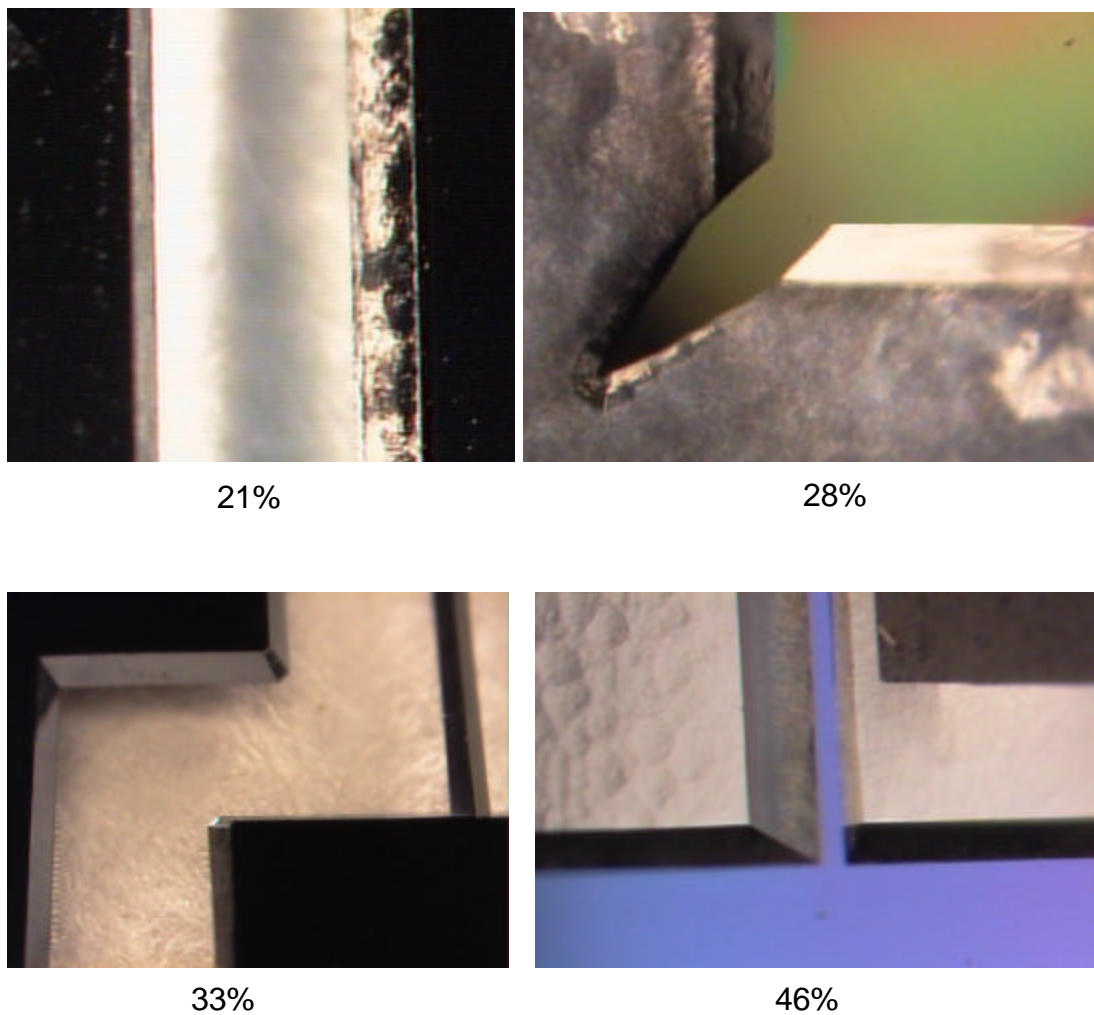


Figura A5 – Qualidade das paredes laterais para diversas concentrações.

Como a qualidade das paredes é de grande importância para que o dispositivo atinja os objetivos previstos em seu projeto, principalmente nas barras de torção e na região do rotor, temos um compromisso entre velocidade de corrosão e qualidade das paredes.

As corrosões realizadas com concentrações entre 28% e 38% apresentaram paredes laterais com boa qualidade.

### A 3 ESTRUTURAS DE COMPENSAÇÃO DE CANTOS

A erosão de cantos convexos é um grande problema na microusinagem química (corrosão anisotrópica) de silício (100).

A fig. A6 mostra um canto sem estrutura compensadora após a corrosão com KOH.

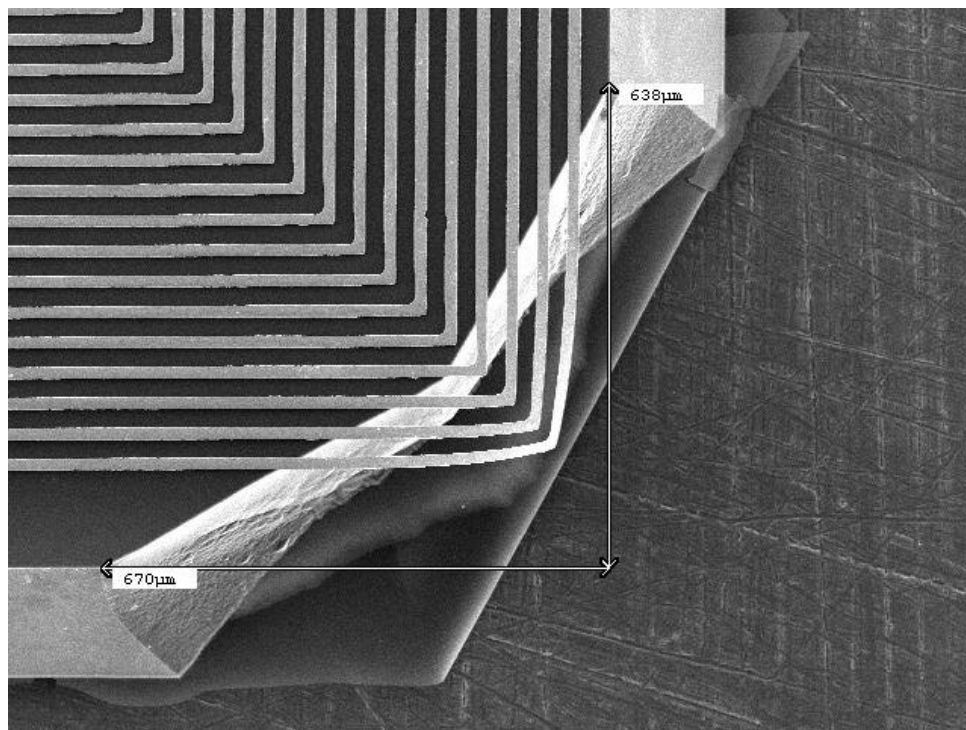
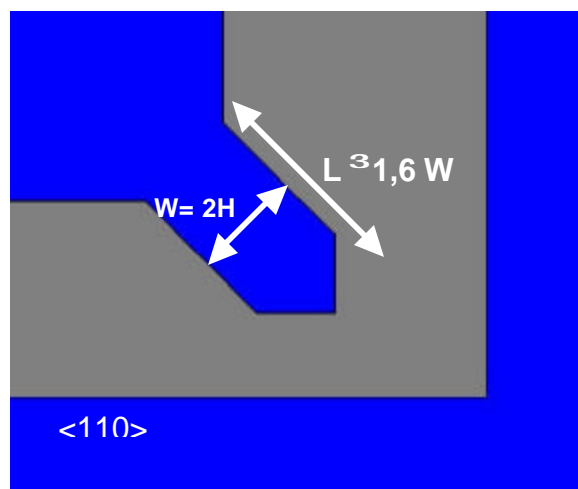


Figura A6 – Estrutura sem compensação de canto.

Como pode ser visto na figura acima, a erosão de cantos avançou por baixo das trilhas metálicas, inutilizando o dispositivo.



Para resolver este problema foram adicionadas à máscara do scanner estruturas de compensação de cantos (fig.A7). Tais estruturas possibilitam a obtenção de cantos perfeitamente definidos, o que garante a geometria desejada <sup>[1]</sup>.



H = Profundidade de Corrosão <100>

W = Largura da estrutura

L = Comprimento da estrutura

Figura A7 – Estrutura de compensação tipo haste inclinada.

A estrutura usada foi do tipo haste inclinada.

As estruturas compensadoras foram testadas para várias concentrações de KOH como mostra a fig. A8.

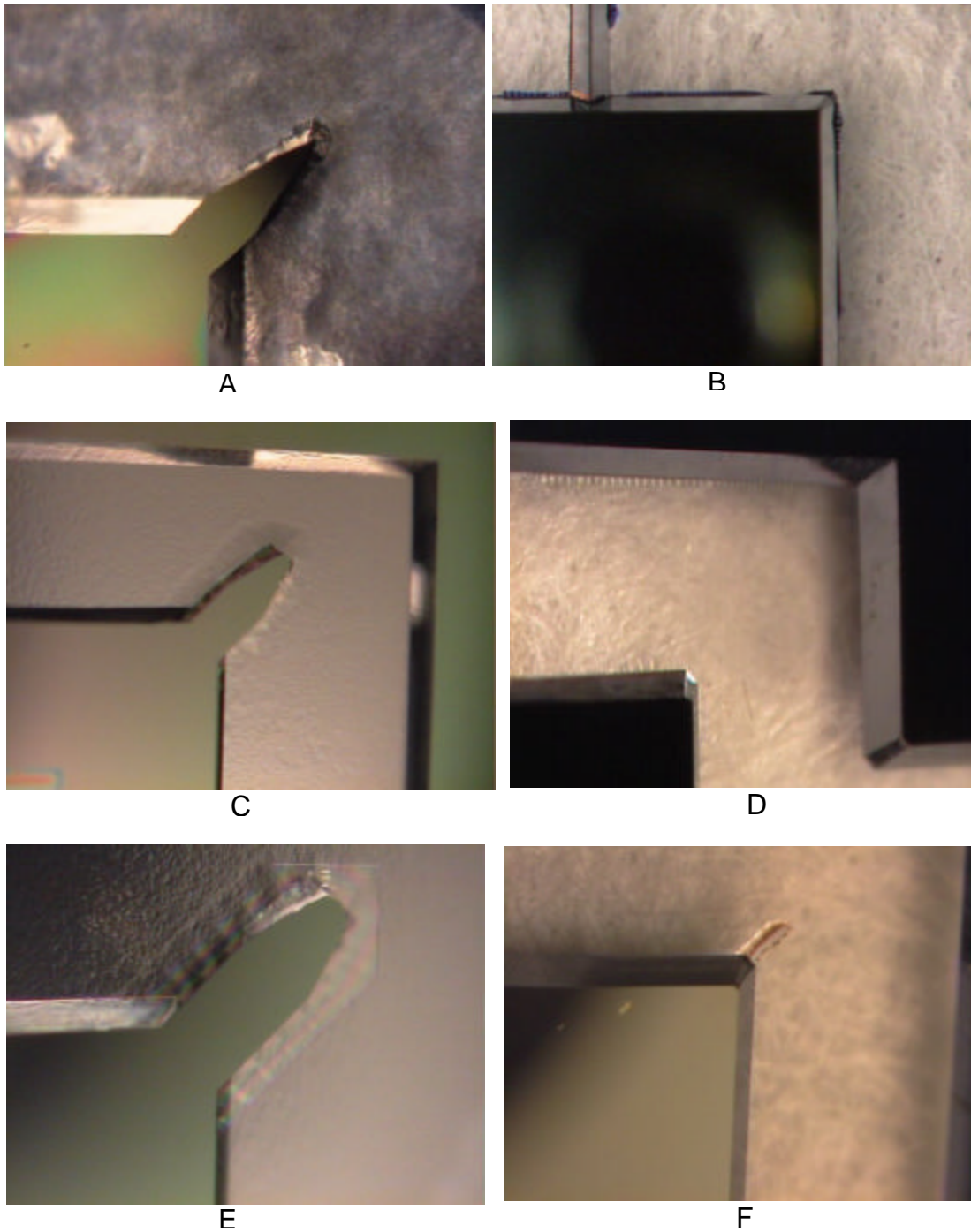


Figura A8 – Cantos compensados durante e no final da corrosão.

(A) a 28% após 100 min e (B) a 28% final

(C) a 33% após 100 min e (D) a 33% final

(E) a 40% após 100 min e (F) a 40% final.

Como se pode observar na fig. A8, as estruturas de compensação de cantos funcionaram para as todas concentrações utilizadas.

Com a utilização das estruturas compensadoras é possível se obter dispositivos com as geometrias desejadas. Os cantos convexos ficam perfeitamente definidos, sem que a erosão danifique o dispositivo.

## BIBLIOGRAFIA

1. H. L. Offereins, H. Sandmaier, K. Marusczyk, K. Kühl and A. Plettner, -cutting of (100) Silicon in KOH”, *Sensors and Materials* 3, (3), 127 - 144, 1992.